

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor

prof. dr. sc. Ivica Smojver

Savo Popović

Zagreb, 2008.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Odbor za diplomske ispite  
Povjerenstvo studija zrakoplovstva



Zagreb, 08. rujna 2008.

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Savo Popović**

Mat. br.: 1209000460

Naslov: **Analiza udarnih oštećenja segmenta konstrukcije trupa velikog putničkog aviona**

Opis zadatka:

Izvršiti metodom konačnih elemenata proračun dijela konstrukcije trupa velikog putničkog aviona. U obzir uzeti geometriju okvira, uzdužnica kao i promjenjivu debljinu oplata.

Geometriju definirati temeljem podataka u Uputama za popravke (*Structural Repair Manual*) te iz raspoložive tehničke dokumentacije dostupne u Croatia Airlines. Vrata za iskrcaj putnika kao i pripadajuću konstrukciju poda ne modelirati već ih zamijeniti odgovarajućim rubnim uvjetima.

Za osnovni slučaj opterećenja uzeti udar zemaljskom opremom u dio oko vrata aviona, prema podacima Croatia Airlines. Udarač (zemaljska oprema) modelirati kao kruti, a brzinu i masu udarača definirati temeljem iskustvenih podataka iz Zračne luke Zagreb. Mjesto dodira konstrukcije i udarača modelirati korištenjem kontaktnih elemenata.

Pokazati veličinu pomaka, te trajnih deformacija, ako je došlo do plastičnih deformacija konstrukcije, u ovisnosti o vremenu. Usporediti rezultate za različite slučajeve opterećenja, kao i različita mjesta oštećenja konstrukcije. Analizu vršiti kao tranzijentno dinamičku korištenjem programa ABAQUS/Explicit, CATIA, Nastran i drugih, prema potrebi.

Zadatak zadan:

11. rujna 2008.

Rok predaje rada:

13. studenog 2008.

Predviđeni datum obrane:

19. - 21. studenog 2008.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivica Smojver

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vedran Žanić

## Zahvala

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr. sc. Ivici Smojveru na stručnoj pomoći koju mi je pružio tijekom pisanja ovog rada.

Također bih se želio zahvaliti svojoj majci na bezrezervnoj podršci koju mi je pružila tijekom studiranja, kao i svoj rodbini, prijateljima i kolegama na ohrabrenju, solidarnosti i strpljivosti.

## **Sažetak**

U ovom radu analizira se udarno opterećenje stražnjeg dijela trupa putničkog zrakoplova Airbus 319, između sekcija FR 64 i FR 70.

Uvodno poglavlje daje načine i opise oštećenja zemaljskom opremom, te prikaz dokumentiranja.

U drugom poglavlju je opisan postupak modeliranja zadane konstrukcije, njegova diskretizacija te vrste upotrijebljenih konačnih elemenata.

Treće poglavlje daje pregled i vrste materijalnih modela.

U četvrtom poglavlju je opisana metoda nelinearne dinamičke analize.

Peto poglavlje daje prikaz rezultata analize konačnim elementima u programu Abaqus/Explicit.

## Sadržaj

Sažetak.....	i
Sadržaj .....	ii
Popis slika.....	iii
Popis oznaka .....	vi
Izjava .....	vii
1. Uvod .....	1
2. Opis konstrukcije.....	3
CAD model konstrukcije .....	4
Gredni elementi .....	5
Ljuskasti elementi.....	11
Povezivanje ljuskastih i grednih elemenata .....	13
3. Materijalni modeli .....	16
Naprezanja i deformacije pri konačnim deformacijama.....	17
Definiranje plastičnosti u programu ABAQUS.....	18
4. Nelinearna eksplicitna dinamika .....	22
Vremenski korak i stabilnost metode .....	24
Kontaktne mehanike modela .....	26
5. Analiza konstrukcije .....	28
6. Zaključak .....	48
7. Literatura .....	49

## Popis slika

Slika 1.1 Stepenice za ukrcaj putnika u zrakoplov Airbus 319 [1] .....	1
Slika 1.2 Oštećenje konstrukcije rudom za vuču [3] .....	2
Slika 1.3 Oštećenja trupa zrakoplova Airbus 319 [2].....	2
Slika 2.1 Razmatrana sekcija trupa zrakoplova Airbus A319 (označena crveno) [4] .....	3
Slika 2.2 Prostorni model konstrukcije, modeliran u programu Catia .....	4
Slika 2.3 Rapored i debljina oplata, dobivene prema [4] .....	5
Slika 2.4 Žičani model uzdužnica i okvira .....	6
Slika 2.5 Raspoloživi gotovi poprečni presjeci u ABAQUS-ovoj bazi [5] .....	7
Slika 2.6 Prikaz definicije proizvoljnog poprečnog presjeka za gredne elemente [5] .....	7
Slika 2.7 Tangenta i normale presjeka grednog elementa u lokalnom koordinatnom sustavu [5] .....	8
Slika 2.8 Orijentacije presjeka uzdužnica definiranih u ABAQUS-u .....	9
Slika 2.9 Orijentacije presjeka okvira definiranih u ABAQUS-u .....	9
Slika 2.10 Stvarni poprečni presjeci - lijevo i njihova interpretacija u ABAQUS – Arbitrary – desno (dimenzije su propisane u Airbusovoj tehničkoj dokumentaciji) [4].....	10
Slika 2.11 Prikaz definicije konvencionalnih ljuskastih elemenata [6].....	11
Slika 2.12 Područja oplata za koje su dodijeljena svojstva debljina ljuskastih elemenata..	12
Slika 2.13 Mreža ljuskastih konačnih elemenata.....	12
Slika 2.14 Povezivanja ljuskastih elemenata s čvorovima grednih elemenata [6] .....	13
Slika 2.15 Zone tolerancije Tie-Constrainta za različito bazirane primarne površine [6]... 14	
Slika 2.16 (a) gredni elementi u ravnini s ljuskastim, dijele čvorove; (b) gredni elementi odmaknuti na površinu ljuski, čvorovi se vertikalno poklapaju; (c) gredni elementi odmaknuti, čvorovi se ne poklapaju [6] .....	15
Slika 3.1 Hookeov dijagram za nominalna naprezanja i deformacije [5] .....	16
Slika 3.2 Rastavljanje stvarne deformacije na elastičnu i plastičnu komponentu [5].....	19
Slika 3.3 Nominalni Hookeov dijagram za korištene materijale [8] .....	20
Slika 3.4 Stvarni Hookeov dijagram u ABAQUS-u – materijal Al 2024 T3 .....	21
Slika 3.5 Stvarni Hookeov dijagram u ABAQUS-u – materijal Al 7050 T3511 .....	21
Slika 4.1 Dimenzije i orijentacija udarača u globalnom koordinatnom sustavu .....	26
Slika 5.1 Prikaz sva tri položaja udarača i mjesta udara u konstrukciju .....	28

Slika 5.2 Raspodjela ekvivalentnog Von Mises naprezanja za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 0.5 m/s u oplatu debljine 1.6 mm.....	30
Slika 5.3 Raspodjela veličine pomaka na mjestu udara pri brzini udarača od 0.5 m/s u oplatu debljine 1.6 mm .....	30
Slika 5.4 Raspodjela pomaka točke udara „A“ za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 0.5 m/s u lim debljine 1.6 mm .....	31
Slika 5.5 Raspodjela ukupne, unutrašnje i kinetičke energije za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 0.5 m/s u lim debljine 1.6 mm.....	31
Slika 5.6 Raspodjela ekvivalentnog Von Mises naprezanja za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 1 m/s u oplatu debljine 1.6 mm.....	33
Slika 5.7Raspodjela veličine pomaka na mjestu udara pri brzini udarača od 1 m/s u oplatu debljine 1.6 mm .....	33
Slika 5.8 Raspodjela pomaka točke udara „A“ za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 1 m/s u lim debljine 1.6 mm.....	34
Slika 5.9 Raspodjela ukupne, unutrašnje i kinetičke energije za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 1 m/s u lim debljine 1.6 mm.....	34
Slika 5.10 Raspodjela ekvivalentnog Von Mises naprezanja za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 0.5 m/s u oplatu debljine 4 mm.....	36
Slika 5.11 Raspodjela veličine pomaka na mjestu udara pri brzini udarača od 0.5 m/s u oplatu debljine 4 mm .....	36
Slika 5.12 Raspodjela pomaka točke udara „B“ za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 0.5 m/s u lim debljine 4 mm .....	37
Slika 5.13 Raspodjela ukupne, unutrašnje i kinetičke energije za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 0.5 m/s u lim debljine 4 mm.....	37
Slika 5.14 Raspodjela ekvivalentnog Von Mises naprezanja za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 1 m/s u oplatu debljine 4 mm.....	39
Slika 5.15 Raspodjela veličine pomaka na mjestu udara pri brzini udarača od 1 m/s u oplatu debljine 4 mm .....	39
Slika 5.16 Raspodjela pomaka točke udara „B“ za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 1 m/s u lim debljine 4 mm.....	40
Slika 5.17 Raspodjela ukupne, unutrašnje i kinetičke energije za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 1 m/s u lim debljine 4 mm.....	40

Slika 5.18 Raspodjela ekvivalentnog Von Mises naprezanja za trajanje analize od 85 ms pri brzini udarača 0.5 m/s u oplatu debljine 6 mm.....	42
Slika 5.19 Raspodjela veličine pomaka na mjestu udara pri brzini udarača od 0.5 m/s u oplatu debljine 6 mm .....	42
Slika 5.20 Raspodjela pomaka točke udara „C“ za dio analize trajanja 40 ms pri brzini udarača 0.5 m/s u lim debljine 6 mm .....	43
Slika 5.21 Raspodjela ukupne, unutrašnje i kinetičke energije za dio analize trajanja 40 ms pri brzini udarača 0.5 m/s u lim debljine 6 mm.....	43
Slika 5.22 Raspodjela ekvivalentnog Von Mises naprezanja za trajanje analize od 85 ms pri brzini udarača 1 m/s u oplatu debljine 6 mm.....	45
Slika 5.23 Raspodjela veličine pomaka na mjestu udara pri brzini udarača od 1 m/s u oplatu debljine 6 mm .....	45
Slika 5.24 Raspodjela pomaka točke udara „C“ za dio analize trajanja 40 ms pri brzini udarača 1 m/s u lim debljine 6 mm.....	46
Slika 5.25 Raspodjela ukupne, unutrašnje i kinetičke energije za dio analize trajanja 40 ms pri brzini udarača 1 m/s u lim debljine 6 mm.....	46
Slika 5.26 Raspodjela energije za probni model sastavljen od samo ljuskastih elemenata; brzina udarača 0.5 m/s, debljina oplata 4mm .....	47



## Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
$A$	$m^2$	stvarna površina presjeka epruvete
$c_d$	$m/s$	brzina širenja vala
$E$	$N/mm^2$	modul elastičnosti
$F$	$N$	stvarna sila
$\mathbf{I}$		vektor unutrašnjih sila
$l$	$m$	stvarna duljina epruvete
$l_0$	$m$	početna duljina epruvete
$L_e$	$m$	duljina elementa
$L_{e,min}$	$m$	minimalna duljina ekementa
$\vec{n}_1$		vektor normale u ravnini poprečnog presjeka grednog elementa u smjeru osi 1
$\vec{n}_2$		vektor normale u ravnini poprečnog presjeka grednog elementa u smjeru osi 1
$\mathbf{M}$		matrica mase
$\mathbf{P}$		vektor vanjskih sila
$t$	$s$	vrijeme analize
$\ddot{\mathbf{u}}$	$m/s^2$	vektor ubrzanja
$\vec{t}$		vektor tangente duž grednog elementa

## Grčke oznake

$\varepsilon_{nom}$		nominalna deformacija
$\varepsilon^{pl}$		stvarna plastična deformacija
$\varepsilon^{el}$		stvarna elastična deformacija
$\varepsilon$		stvarna deformacija
$\varepsilon^t$		stvarna ukupna deformacija
$\Delta t$	$s$	vremenski inkrement
$\sigma$	$N/mm^2$	stvarno naprezanje
$\sigma_{0.2}$	$N/mm^2$	granica plastičnosti
$\omega_{max}$		maksimalna vlastita frekvencija
$\xi$		dio kritičnog prigušenja u modu s maksimalnom vlastitom frekvencijom

## **Izjava**

Izjavljujem da sam diplomski zadatak izradio samostalno i odgovorno u zadanom vremenskom razdoblju, uz stručnu pomoć prof.dr.sc. Ivice Smojvera. Pri izradi diplomskog rada sam se koristio znanjem stečenim tijekom studija te navedenom literaturom.

---

Savo Popović

## 1. Uvod

Civilno zrakoplovstvo predstavlja jedno od najpropulzivnijih oblika transporta. Broj putnika iz godine u godinu sve više raste, a da bi zrakoplovne tvrtke uspješno odgovorile na povećanu potražnju, uvodi se sve veći broj letjelica.

Osim propisanih kriterija sigurnosti koje zrakoplovi moraju zadovoljiti tijekom leta, postoje određeni kriteriji i pravila koja moraju zadovoljena i pri opsluživanju zrakoplova na zemlji. Oštećenja na strukturi zrakoplova često nastaju pri kontaktu sa zemaljskom opremom, koja moraju biti uočena i ispravljena prije svakog leta.



Slika 1.1 Stepenice za ukrcaj putnika u zrakoplov Airbus 319 [1]

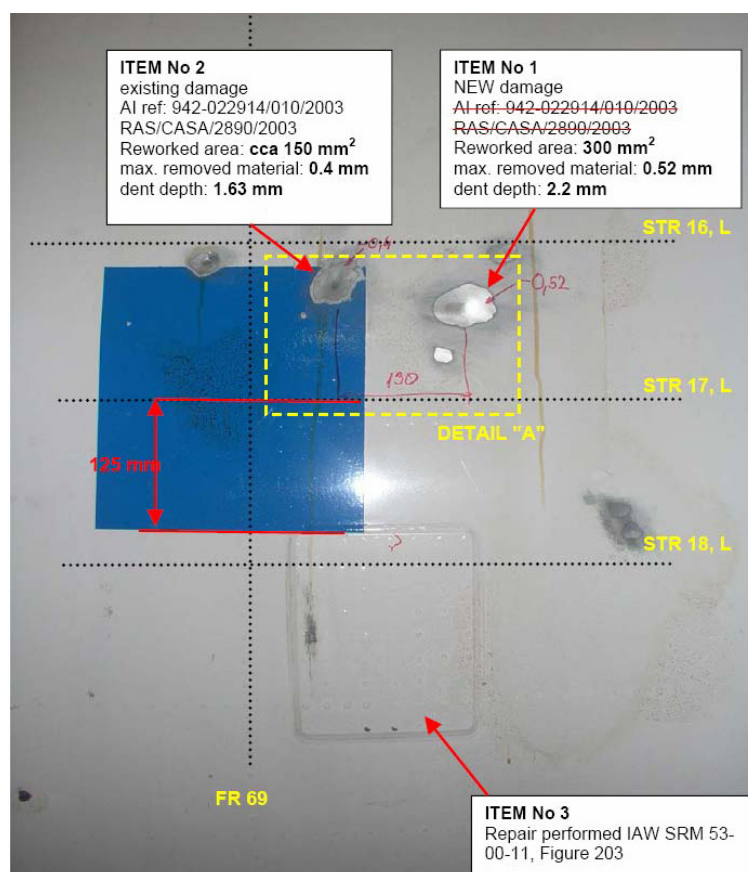
Na manjim zračnim lukama gdje se ukrcaj putnika vrši ovakvim pokretnim stepenicama, dosta su česta oštećenja, a osim stepenicama, oštećenja nastaju i od konvejera za ukrcaj prtljage te opskrbnih vozila [2].

Ukoliko je nastalo takvo oštećenje, potrebno ga je dokumentirati i izmjeriti, kako bi se utvrdilo da li se ono nalazi unutar dopuštenih granica. Ona oštećenja koja prelaze dopuštene granice propisane od proizvođača potrebno je popraviti, a opis i načini popravka su opisani u dokumentu za popravke (*Structural Repair Manual*) [2].

Na slici 1.2 prikazana je primjer oštećenja rudom za vuču zrakoplova, a na slici 1.3 je prikazan dokumentiran primjer oštećenja od ukrcajnih stepenica.



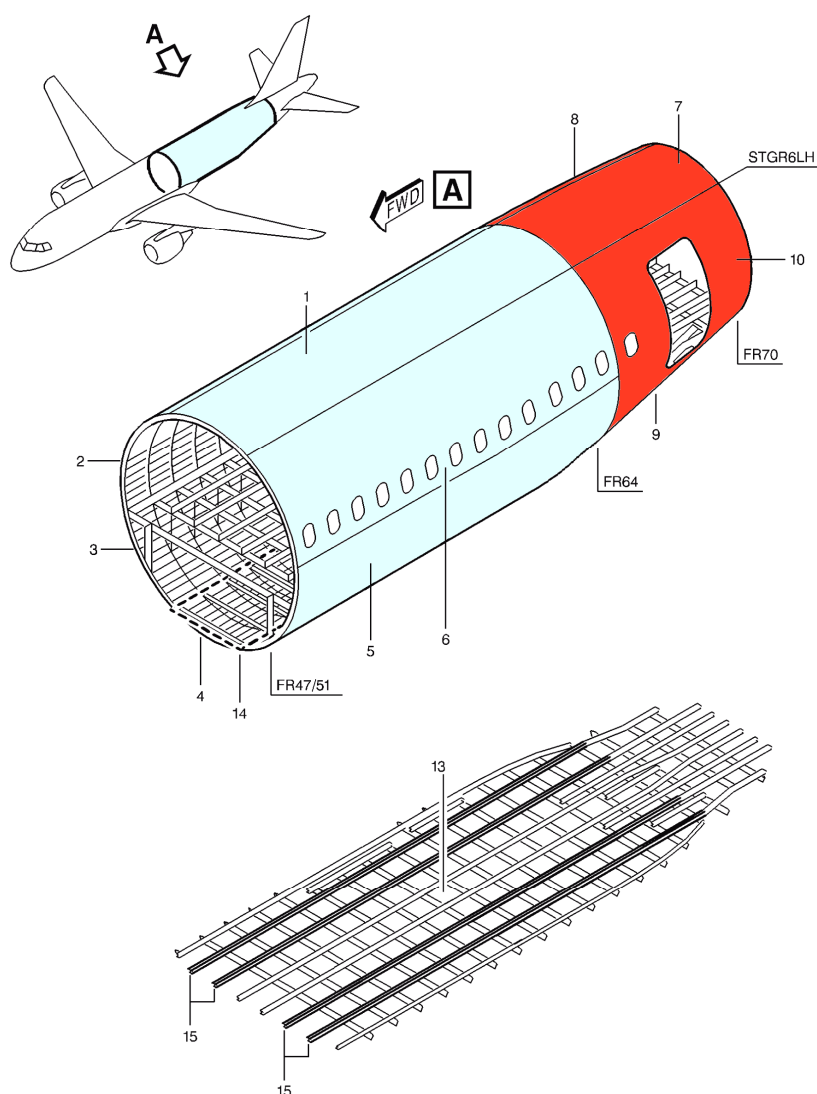
Slika 1.2 Oštećenje konstrukcije rudom za vuču [3]



Slika 1.3 Oštećenja trupa zrakoplova Airbus 319 [2]

## 2. Opis konstrukcije

Prikazan je i analiziran stražnji dio trupa zrakoplova, od sekcije trupa 64 do sekcije 70. Unutar te sekcije se nalaze stražnja vrata za ulazak putnika te prozori na početku sekcije. Kako je konstrukcija trupa na mjestu otvora za vrata oslabljena, oko otvora su izvršena ojačanja oplata njenim postupnim zadebljnjima te su postavljeni ojačani profili uz sam rub otvora, na koje se montira mehanizam za otvaranje i brava.



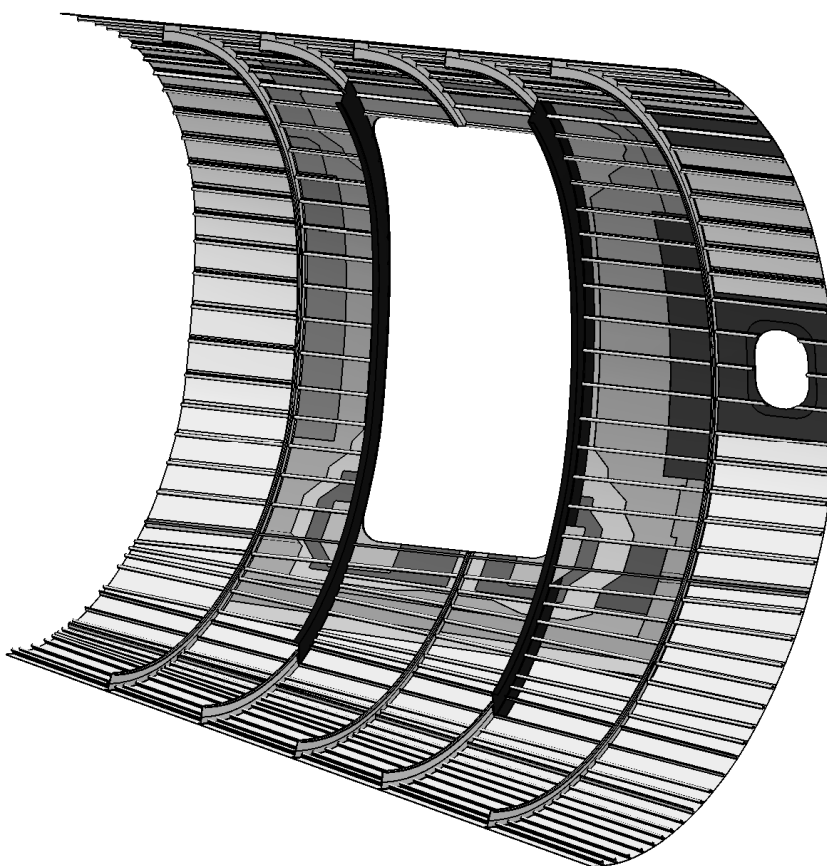
Slika 2.1 Razmatrana sekcija trupa zrakoplova Airbus A319 (označena crveno) [4]

Osim povećane debljine oplata oko otvora za vrata i ojačanih C-profila uz desni i lijevi rub otvora, dodatnu krutost konstrukciji trupa daje i podnica, koja je izvedena kao složena

konstrukcija sa uzdužnim i poprečnim gredama te vertikalnim potpornicama, po cijeloj dužini trupa.

## CAD model konstrukcije

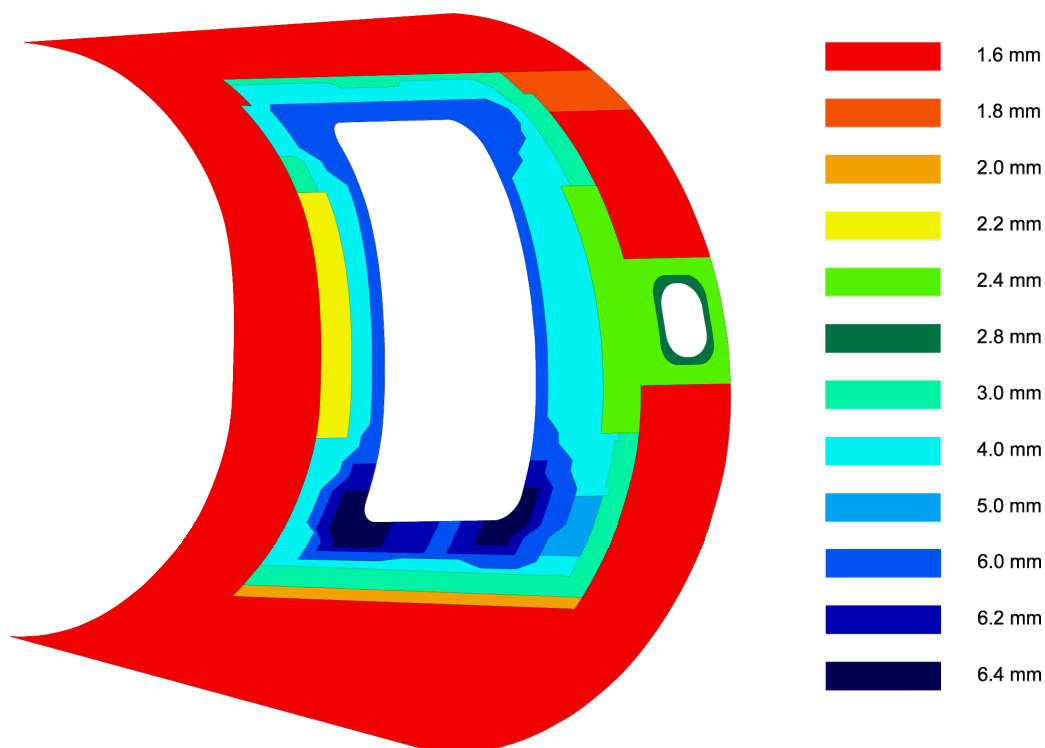
Iz raspoložive tehničke dokumentacije Uputa za popravke [4] u programu Catia je modelirana geometrija konstrukcije. U obzir su uzeti oblici uzdužnih i poprečnih ojačanja trupa te promjenjiva debljina oplata.



Slika 2.2 Prostorni model konstrukcije, modeliran u programu Catia

Oplata i njene različite debljine su modelirani samo kao površine sa određenim geometrijskim granicama, dok su uzdužnice i okviri modelirani kao 3-dimezionalna tijela. U kasnijoj fazi analize konstrukcije konačnim elementima ovaj model je pojednostavljen na površine bez debljine - koje predstavljaju oplatu, te žičani model – koji predstavlja grede, uzdužnice i okvire. Svojstva debljine i značajki poprečnog presjeka greda su dodijeljeni u programu za konačne elemente ABAQUS.

Na slici 2.3 naznačene su debljine limova oplata.



Slika 2.3 Rapored i debljina oplata, dobivene prema [4]

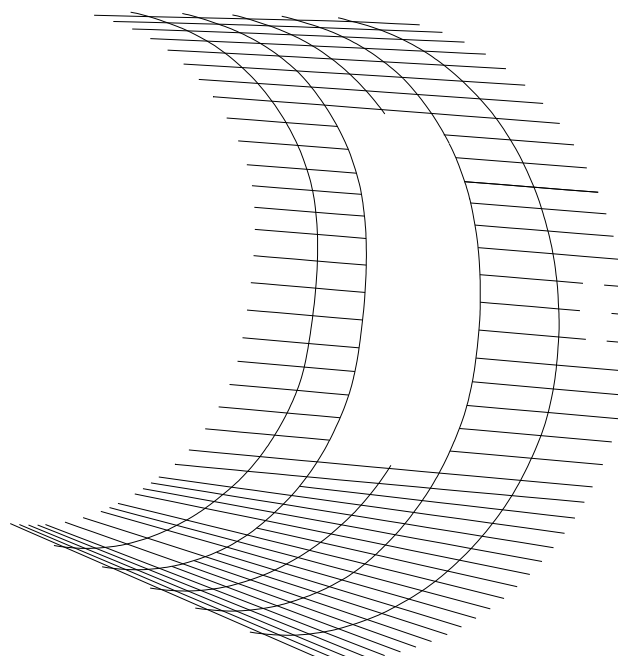
## Gredni elementi

Teorija grednog elementa je 1-D aproksimacija 3-D kontinuuma. Redukcija u 1-dimenzionalnost je direktan rezultat pretpostavke o vitkosti, tj. da su dimenzije poprečnog presjeka male u usporedbi s duljinom grede. Uzdužna dimenzija mora biti interpretirana kao globalna dimenzija (a ne kao duljina elementa), kao npr:

- razmak između oslonaca,
- razmak između velikih promjena poprečnih presjeka

ABAQUS podrazumijeva gredni element kao 1-D linijski element u 3-D prostoru ili x-y ravnini koja određenu krutost povezuje s deformacijom osi grede. Ove deformacije mogu biti aksijalne; promjene zakrivljenosti (savijanje) ili uvijanje. Glavna prednost grednih elemenata je njihova geometrijska jednostavnost i mali broj stupnjeva slobode.

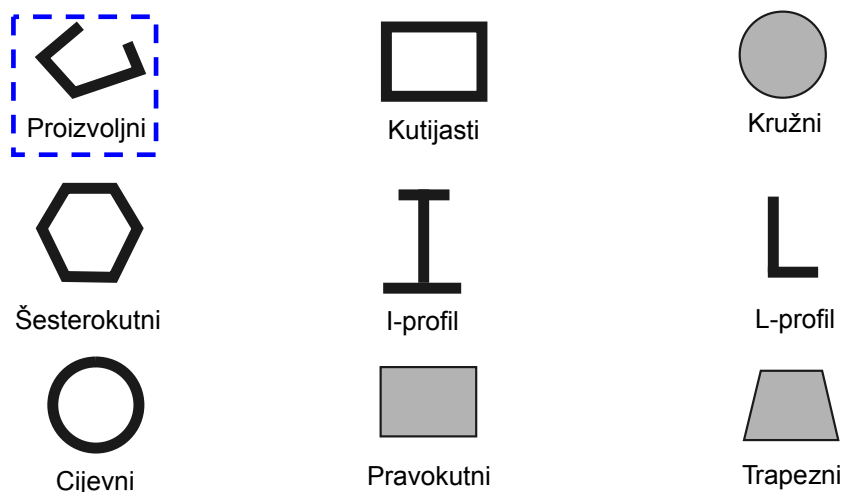
Za dio geometrijskog modela - uzdužna i poprečna ojačanja sekcije trupa, korišteni su gredni elementi, koji su kinematičkim vezama (*Tie-Constraint-a*) vezani za ljuskaste elemente. Poprečni presjeci grednih elemenata su zadani kao tankostijeni i otvoreni, te jednake debljine profila (podaci dobiveni iz raspoložive Airbusove tehničke dokumentacije). Budući da je geometrija uzdužnih i poprečnih ojačanja trupa (uzdužnica i okvira) dobivena pretvaranjem žičanog 3-D CAD modela napravljenog u programu CATIA u ABAQUS-ov geometrijski model, u ABAQUS-u se definiranje tipa grednog elementa (2-D ili 3-D) dodjeljuje očitavanjem svojstva prije definirane geometrije. Tako je žičani model postupkom diskretizacije pretvoren u 3-D mrežu grednih konačnih elemenata (jer osi greda mijenjaju smjer kroz sve 3 dimenzije na zadanom dijelu konstrukcije).



Slika 2.4 Žičani model uzdužnica i okvira

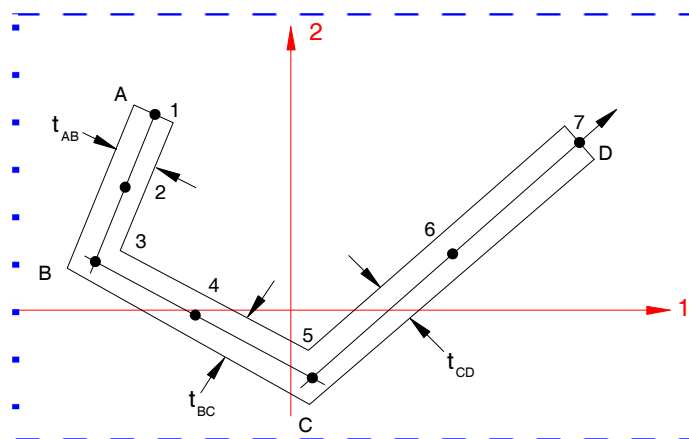
Prvo je potrebno odrediti svojstva poprečnih presjeka grednih elemenata kao i njihov materijal. Profil grede se u ABAQUS-u može odabrati na jedan od načina: odabirom već gotovog iz baze profila pri čemu je potrebno zadati oblik i dimenzije presjeka; definiranjem općenitog presjeka zadajući inženjerska svojstva - površinu presjeka i momente tromosti te torzijsku konstantu (za tankostijene otvorene presjeke); ili koristeći mrežu specijalnih 2-D elemenata čije su geometrijske veličine proračunate numerički (debele grede).





Slika 2.5 Raspoloživi gotovi poprečni presjeci u ABAQUS-ovoj bazi [5]

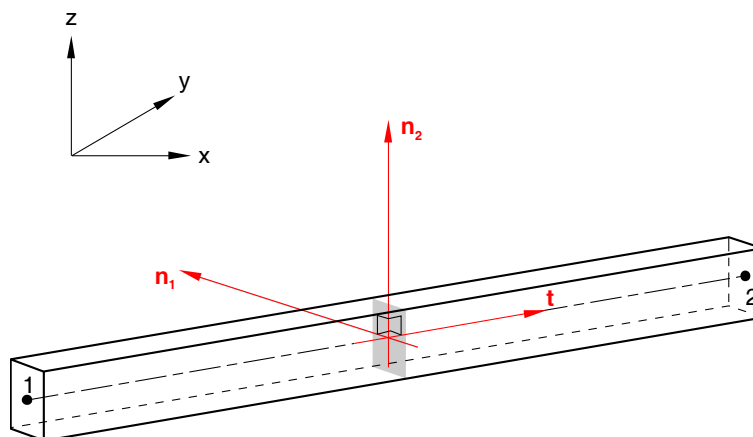
U ABAQUSovoj bazi poprečnih presjeka odabrani su oni koji su najbliže opisivali stvarne poprečne presjeke - *Section type: Arbitrary* (proizvoljan), budući da nisu postojale definicije stvarnih presjeka. Ovakva metoda dodjele svojstava poprečnog presjeka grede uzima samo u obzir koordinate početka i kraja pojedinog segmenta profila te debljinu tog segmenta (slika ispod).



Slika 2.6 Prikaz definicije proizvoljnog poprečnog presjeka za gredne elemente [5]

### Orijentacija poprečnog presjeka

Nakon izbora geometrije i opisivanja svojstava poprečnog presjeka (za gredni element prvog reda, torzijski deformabilan, oznake B31), potrebno je definirati njegovu orijentaciju u globalnom (kartezijskom) koordinatnom sustavu.

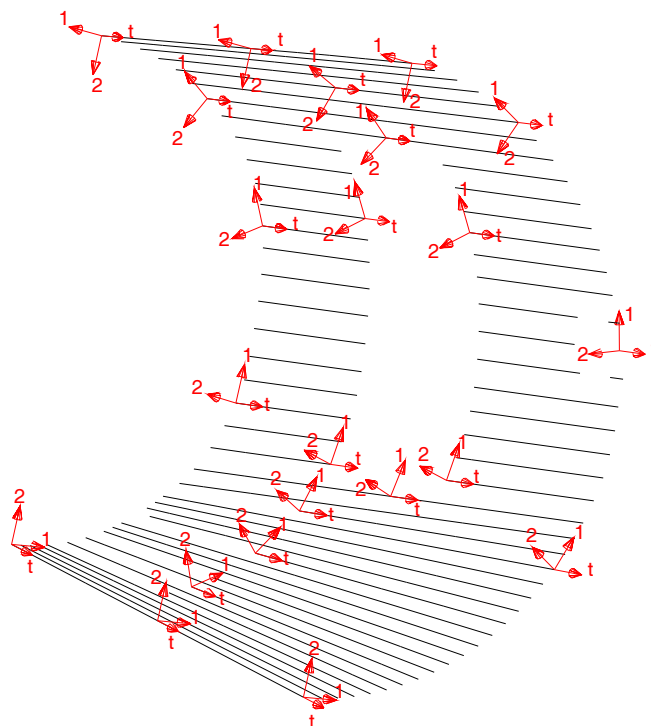


Slika 2.7 Tangenta i normale presjeka grednog elementa u lokalnom koordinatnom sustavu [5]

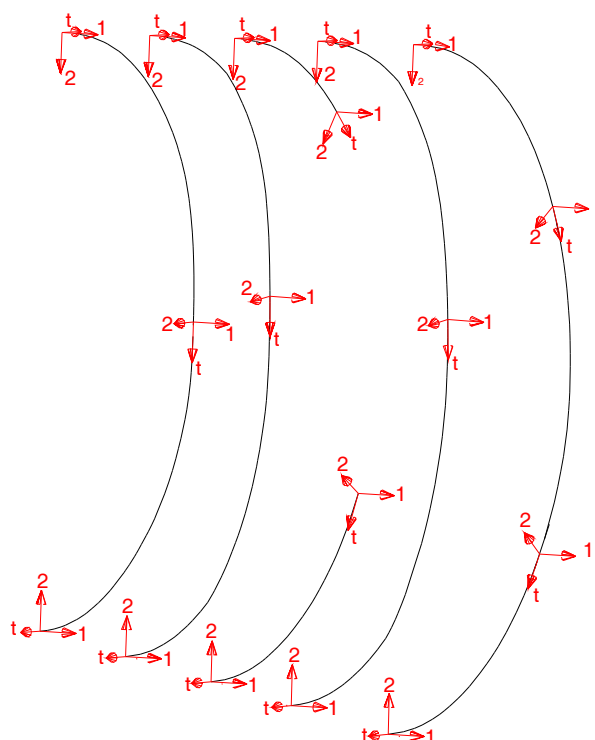
Lokalna tangenta  $\mathbf{t}$  uzduž osi grede predstavlja vektor usmjeren od čvora 1 prema čvoru 2 elementa. Poprečni presjek grede je okomit na tu tangentu. Osi lokalnog koordinatnog sustava 1-2 presjeka grede predstavljene su normalama  $\mathbf{n}_1$  i  $\mathbf{n}_2$ . Ta tri vektora tvore lokalni desni koordinatni sustav, tako da po pravilu vektorskog produkta vrijedi:

$$\vec{\mathbf{t}} \times \vec{\mathbf{n}}_1 = \vec{\mathbf{n}}_2 \quad (1)$$

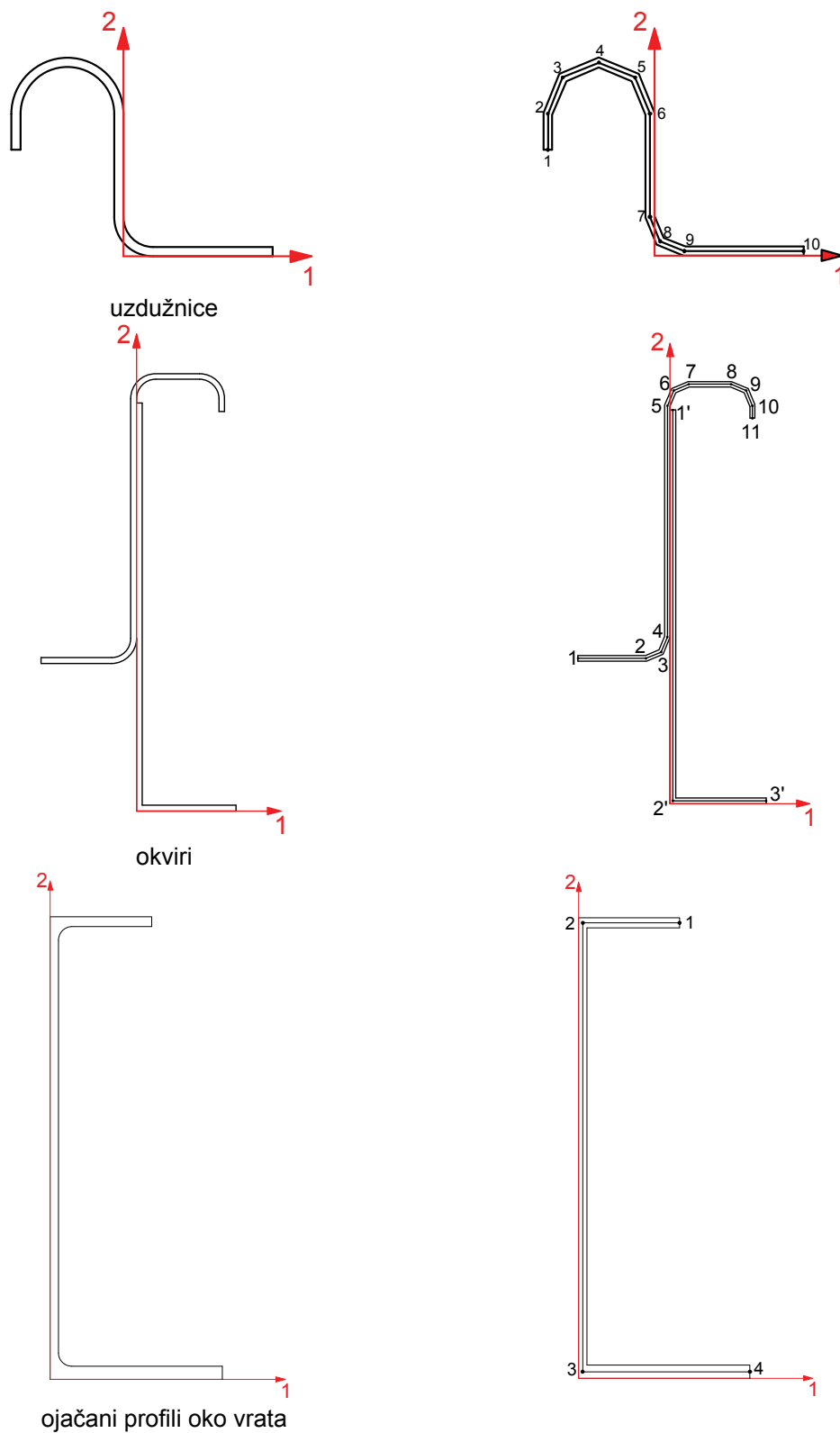
Kako su za zadanu konstrukciju osi lokalnog koordinatnog sustava 1 i 2 predstavljale ujedno i osi za koje je ABAQUS računao vrijednosti momenata tromosti presjeka uzdužnica i okvira, trebalo je ručnim unošenjem u sam program podesiti orijentacije presjeka svake uzdužnice i okvira. Taj posao je izvršen tako da je u programu AutoCAD konstruiran smjer svake normale  $\mathbf{n}_1$  te su nakon toga ispisane njihove koordinate koje su zatim unešene u predprocesor programa ABAQUS



Slika 2.8 Orijentacije presjeka uzdužnica definiranih u ABAQUS-u



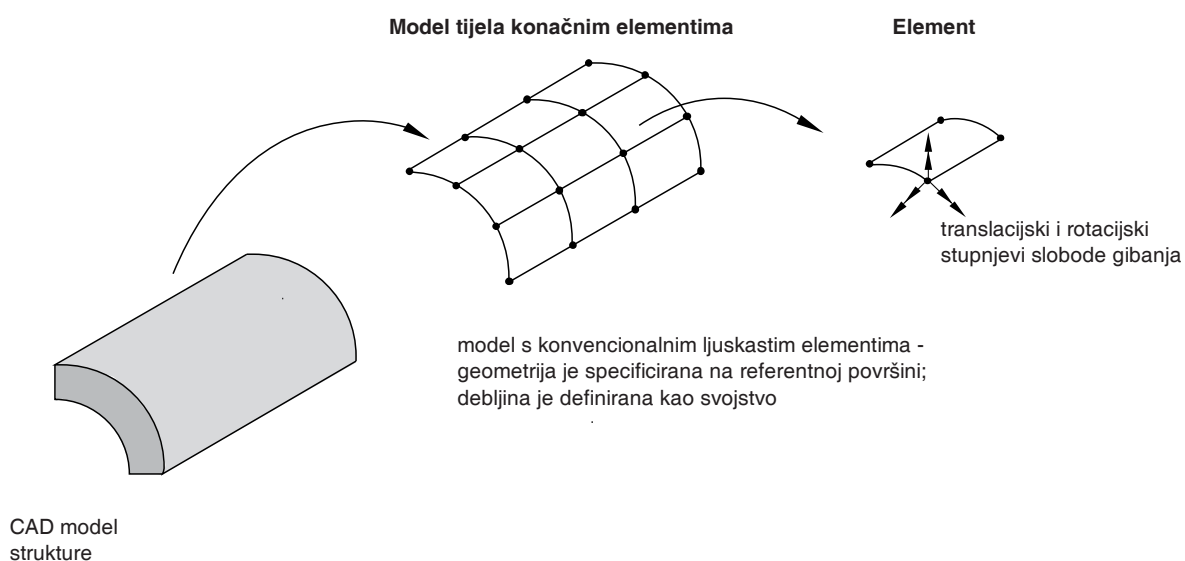
Slika 2.9 Orijentacije presjeka okvira definiranih u ABAQUS-u



**Slika 2.10 Stvarni poprečni presjeci - lijevo i njihova interpretacija u ABAQUS – Arbitrary – desno (dimenzije su propisane u Airbusovoj tehničkoj dokumentaciji) [4]**

## Ljuskasti elementi

Oplata promatrane sekcije trupa zrakoplova je zbog svoje zakrivljenosti i male debljine u odnosu na ostale dimenzije, pogodna za modeliranje tzv. konvencionalnim ljuskastim elementima [Analysis]. Diskretizacija konstrukcije ovakvim elementima podrazumijeva definiranje geometrije samo na referentnoj - srednjoj plohi konstrukcije, po njezinoj debljini. Svojstva debljine i materijala se takvoj plohi dodaju naknadno.

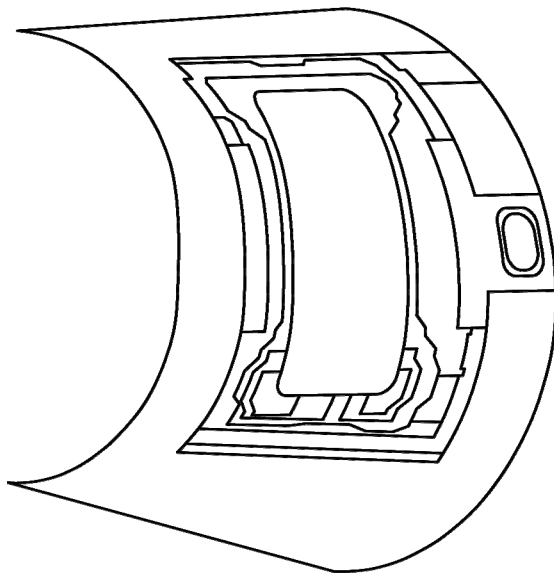


Slika 2.11 Prikaz definicije konvencionalnih ljuskastih elemenata [6]

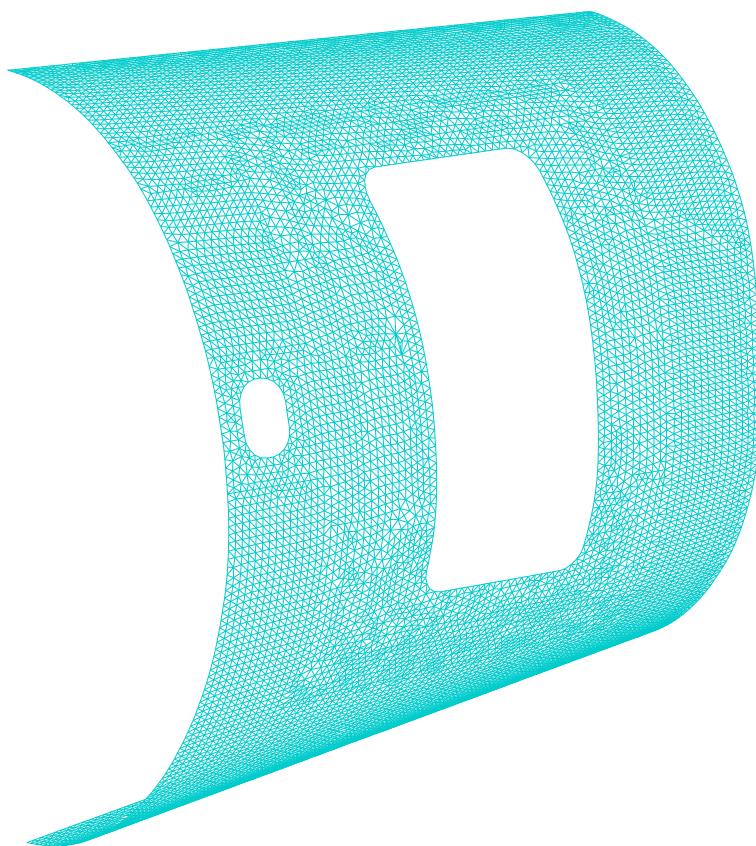
Ovakvi konačni elementi osim rotacijskih posjeduju i translacijske stupnjeve slobode gibanja te su stoga pogodni i za probleme savijanja tankostijenih zakrivljenih konstrukcija [6]. Unutrašnje veličine kod tako diskretizirane konstrukcije predstavljaju momenti savijanja, uvijanja i poprečne sile, dok vanjsko opterećenje preuzimaju i membranske sile koje djeluju u tangencijalnoj ravnini srednje plohe.

U ABAQUSovoj bazi elemenata definirani su još i ljuskasti kontinuirani elementi koji posjeduju i geometrijsku debljinu (poput 3-D tijela) te imaju samo translacijske stupnjeve slobode gibanja. Modeliranje nekih dijelova geometrije takvim elementima iziskivalo bi puno više vremena; te stoga u ovoj analizi nisu upotrebljavani. Za diskretizaciju promatrane konstrukcije oplata korišteni su trokutasti ljuskasti elementi, s tri čvora. Svojstva debljine su dodijeljena površinama modela prethodno definiranim u programu

Catia (slika 2.12). Na modelu je isprobano nekoliko varijanti mreža, gdje je trebalo riješiti kompromis između guste mreže i ne prelaženja minimalnog omjera karakteristične duljine elementa i njegove debljine.



**Slika 2.12 Područja oplata za koje su dodijeljena svojstva debljina ljuskastih elemenata**

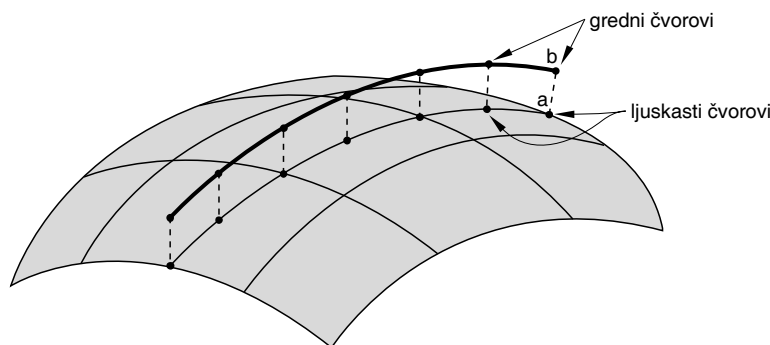


**Slika 2.13 Mreža ljuskastih konačnih elemenata**

## Povezivanje ljuskastih i grednih elemenata

U stvarnoj konstrukciji uzdužnice i okviri trupa služe kao ukrute ljuskaste oplata te su kod klasičnih metalnih izvedbi zrakoplova najčešće spojeni zakovicama, kako bi od oplata direktno prenijeli opterećenja. Iako je u programu ABAQUSu modeliranje takvih spojeva moguće, ono je izrazito kompleksno i vremenski i proračunski, te se s obzirom na velik broj zakovica u razmatranoj sekciji trupa, izbjeglo.

Spajanje grednih i ljuskastih elemenata je izvedeno korištenjem povezivanja preko kinematskih veza (*Tie-Constraint*) [6], na način da je posebno izdvojen žičani diskretizirani model uzdužnica i okvira, koji je preko svojih čvorova spojen s površinom ljuskastih elemenata oplata u čvrstu vezu. Ovakva veza omogućuje da se pomaci i deformacije ljuske direktno prenose na grede, odnosno da su im stupnjevi slobode gibanja u spoju identični [6].



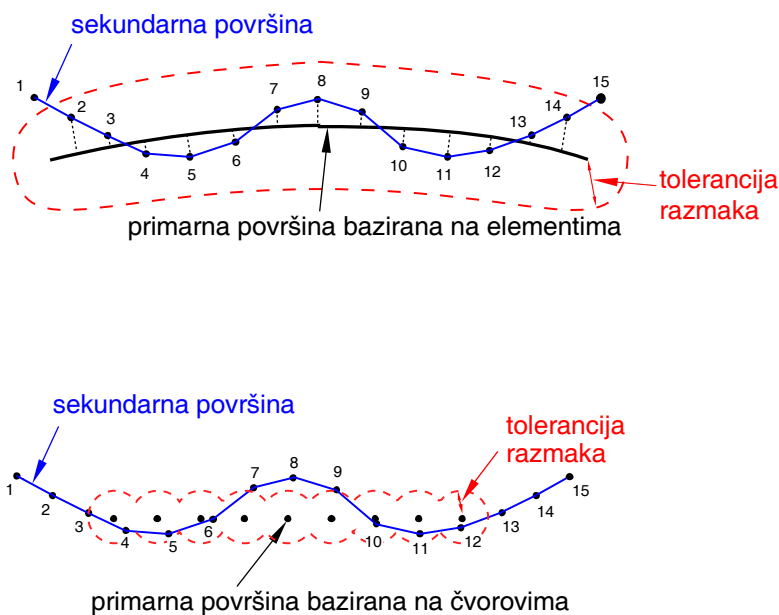
Slika 2.14 Povezivanja ljuskastih elemenata s čvorovima grednih elemenata [6]

Sam *Tie-Constraint* je izveden tako da je baziran na površinskim ograničenjima; potrebno je definirati primarnu i sekundarnu površinu koje će biti povezane; također osim jedne od površina, mogu se povezati površina sa setom čvorova.

Primarna površina u modelu predstavlja površinu ljuskastih elemenata oplata, a sekundarnu set čvorova grednih elemenata. Izvor [6] preporuča povezivanje na taj način da se poklapaju čvorovi oba geometrijska entiteta, posebno kod slučajeva ljuski s ukrutama; međutim moguće je i općenito “nalijeganje” grede na ljusku gdje se čvorovi međusobno ne poklapaju. Ovo je ujedno i slučaj sa zadanim modelom zbog nepravilne geometrije, gdje bi bilo dosta komplicirano izvesti spomenuto poklapanje.

Program ABAQUS automatski proračunava udaljenost do koje utjecaj primarnog čvora ima na sekundarni čvor, odnosno do koje će međusobne udaljenosti oni biti povezani. Ta se udaljenost, tj. tolerancija može i ručno podesiti u samom programu, na unaprijed zadanu točnost.

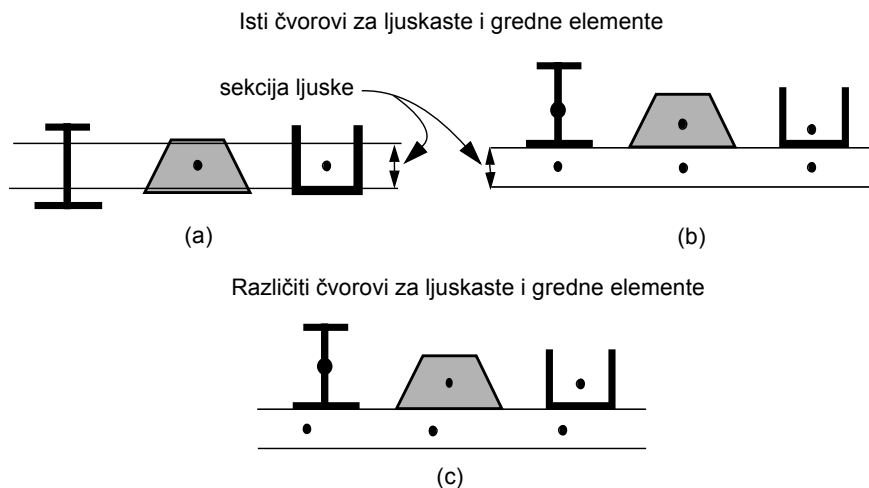
Ovim se omogućuje lakše modeliranje jer su mreže i čvorovi ljuskastih i grednih elemenata neovisne jedna o drugoj, što kod kompleksnih geometrija znatno olakšava i ubrzava postupak stvaranja mreže konačnih elemenata.



Slika 2.15 Zone tolerancije Tie-Constrainta za različito bazirane primarne površine [6]

Dodatan problem ovakvog koncepta je i taj što su svojstva grednih elemenata općenito definirana za centar težišta poprečnog presjeka, a položaj gredne ukrute na ljusci je takav da postoji odstojanje između grednog i ljuskastog elementa, u smjeru okomitom na ravninu ljuske (slika 2.16).





**Slika 2.16 (a) gredni elementi u ravlini s ljuskastim, dijele čvorove; (b) gredni elementi odmaknuti na površinu ljuski, čvorovi se vertikalno poklapaju; (c) gredni elementi odmaknuti, čvorovi se ne poklapaju [6]**

Taj je problem riješen na način da su svojstva presjeka grednih elemenata (momenti tromosti oko osi 1 i 2) propisana uzimajući u obzir udaljenost njihovih čvorova od površine ljuske – ishodišta lokalnog koordinatnog sustava 1-2 (slika 2.10).

### 3. Materijalni modeli

Za promatranu konstrukciju, prema [4], korištene su dvije vrste materijala:

- oplata - aluminijska legura 2024 T3 (ISO oznaka AlCu4Mg1)
- uzdužnice i okviri - aluminijska legura 7050 T73511 (ISO oznaka AlZn6CuMgZr)

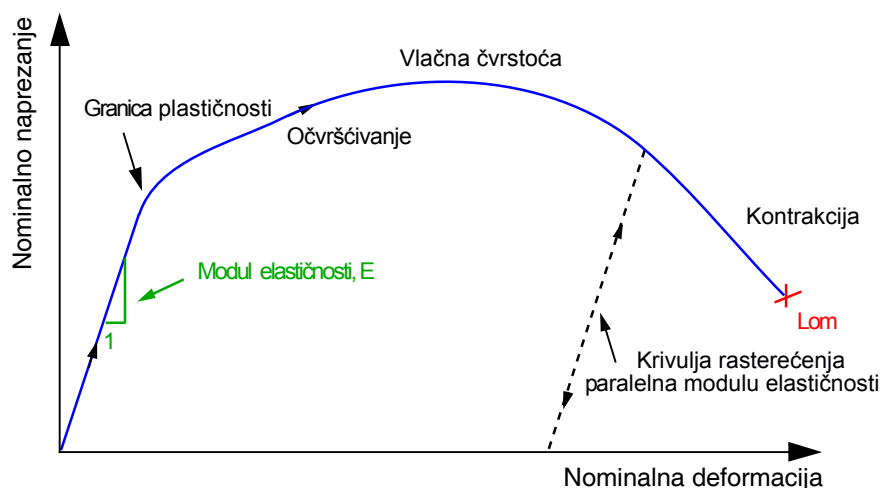
Osnovna mehanička svojstva ovih materijala su prikazana u tablici 1, prema [7]:

**Tablica 1**

Materijal	Gustoća, [kg/m <sup>3</sup> ]	Modul elastičnosti, [GPa]	Vlačna čvrstoća, [MPa]	Granica razvlačenja, [MPa]	Poissonov koeficijent
Al 2024 T3	2780	73.1	469	324	0.33
Al 7050 T3511	2830	71.7	496	434	

Ovakvi osnovni podaci o mehaničkim svojstvima materijala mogu se naći u različitoj literaturi. Kako je cilj analize provjeriti da li u promatranoj konstrukciji dolazi do plastičnih deformacija uslijed udarnog opterećenja, potrebno je zadati programu ABAQUS svojstva primjenjenih materijala i za plastično područje.

Velik broj metalnih materijala pokazuje približno linearno ponašanje pri malim veličinama deformacija, te je ovisnost krutost materijala – modul elastičnosti, konstantna. Ovakvo ponašanje nazivamo elastičnim. Povećanjem naprezanja (i deformacija), metali počinju pokazivati nelinearno, neelastično ponašanje odnosno plastičnost (slika 3.1).



**Slika 3.1 Hookeov dijagram za nominalna naprezanja i deformacije [5]<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Dijagram je dobiven za statički vlačni pokus.

Prijelaz iz elastičnosti u plastičnost materijala se događa pri granici plastičnosti (na Hookeovom dijagramu, slika 3.1). Kod većine metala naprezanje na granici plastičnosti iznosi 0.05 do 0.1% modula elastičnosti.

Za aluminijske legure krivulja u Hookeovom dijagramu je kontinuirana, bez naglih skokova i lomova te se granicom plastičnosti smatra naprezanje koje uzrokuje relativno produljenje od 0.2% ( $\sigma_{0.2}$ ).

Deformacija metala pod vlačnim opterećenjem prije točke loma, može uzrokovati veliko lokalno izduženje i stanjivanje presjeka (kontrakciju). Naprezanje koje odgovara djelovanju sile na nedeformirani presjek naziva se nominalno; ono uzrokuje nominalne deformacije koje odgovaraju promjeni duljine po nedeformiranoj duljini. Pri kontrakciji je nominalno naprezanje u metalu manje od njegove vlačne čvrstoće. Ovakvo ponašanje materijala je uzrokovano geometrijom ispitivanog uzorka (epruvete), vrste ispitivanja te načinom mjerenja naprezanja i deformacija. Kod tlačnog ispitivanja dobivena krivulja u Hookeovom dijagramu nema područje kontrakcije, jer se metal ne sužava pri tlačnom opterećenju. Matematički model koji opisuje plastično ponašanje metala trebao bi uzeti u obzir razlike vlačnog i tlačnog ponašanja neovisno o ispitivanoj geometriji ili primjenjenom opterećenju. Ovo se može postići, ako se poznate veličine nominalnog naprezanja ( $F/A_0$ ) i nominalne deformacije ( $\Delta l/l_0$ ), zamijene novim izmjerenim veličinama naprezanja i deformacije koje uzimaju u obzir promjenu presjeka tijekom konačnih deformacija<sup>2</sup>.

## Naprezanja i deformacije pri konačnim deformacijama

Za tlačno i vlačno naprezanje deformacije su iste ako se razmatraju unutar granica kao [5]:  $\Delta l \rightarrow dl \rightarrow 0$ , tj,

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l} \quad (2)$$

---

<sup>2</sup> indeks 0 se odnosi na nedeformirano (početno) stanje materijala

te

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (3)$$

gdje je  $l$  trenutna duljina,  $l_0$  početna duljina i  $\varepsilon$  stvarna (logaritamska) deformacija.

Mjera naprezanja koja je povezana s stvarnom deformacijom naziva se stvarno naprezanje i definirano je kao omjer stvarne sile i stvarne površine.

Duktilni metali podvrgnuti konačnim deformacijama, imati će istu ovisnost deformacija o naprezanju u vlačnom i tlačnom području, ako se prikaže kao stvarna deformacija ovisna o stvarnom naprezanju.

## Definiranje plastičnosti u programu ABAQUS

Kao je već ranije navedeno, da bi se dobio mogući plastični odziv promatrane konstrukcije, potrebno je unijeti podatke o plastičnim deformacijama i naprezanjima kod kojih te deformacije nastaju. Te dvije skupine podataka koje se unešene u program su stvarna naprezanja i stvarne deformacije.

U literaturi [8] su prikazani podaci za nominalna naprezanja i deformacije te ih je potrebno pretvoriti u stvarne vrijednosti.

Veza između stvarne i nominalne deformacije definirana je izrazom:

$$\varepsilon_{nom} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - \frac{l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \quad (4)$$

Sređivanjem ovog izraza i logaritmiranjem:

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (5)$$

Uz pretpostavku nestlačivosti materijala, veza stvarnog i nominalnog naprezanja zapisuje se

$$l_0 A_0 = l A \quad (6)$$

Trenutna površina poprečnog presjeka određena je izrazom

$$A = A_0 \frac{I_0}{I} \quad (7)$$

Zamjenom ovog izraza u izraz za stvarno naprežanje određeno je :

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \frac{I}{I_0} = \sigma_{nom} \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (8)$$

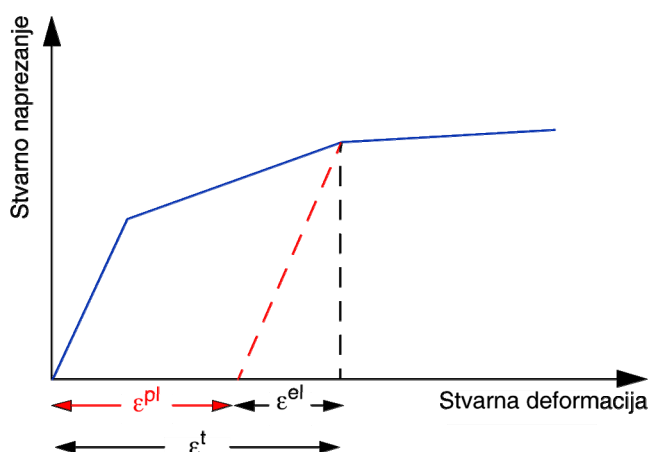
gdje  $\frac{I}{I_0}$  može biti zapisano kao:

$$1 + \varepsilon_{nom} \quad (9)$$

Zadnja supstitucija omogućuje definiranje odnosa između stvarnog naprežanja s nominalnim naprežanjem i deformacijom:

$$\sigma = \sigma_{nom} (1 + \varepsilon_{nom}) \quad (10)$$

Klasični model plastičnosti u ABAQUS-u opisuje plastično ponašanje većine metala. ABAQUS glatku krivulju ponašanja metala u Hookeovom dijagramu aproksimira nizom ravnih linija koje spajaju unešene točke. Budući da broj unešenih točaka nije ograničen, moguće je dovoljno dobro aproksimirati stvarno ponašanje materijala. Podaci o plastičnosti definiraju ovisnost stvarnog naprežanja na granici plastičnosti o stvarnoj plastičnoj deformaciji. Podaci o deformacijama ispitivanih materijala [8] ne sadrže informaciju o plastičnim deformacijama, već o ukupnim (slika 3.2)



Slika 3.2 Rastavljanje stvarne deformacije na elastičnu i plastičnu komponentu [5]

Zbog toga je izvršeno rastavljanje na elastičnu i plastičnu komponentu na sljedeći način:

$$\varepsilon^{pl} = \varepsilon^t - \varepsilon^{el} = \varepsilon^t - \frac{\sigma}{E} \quad (11)$$

gdje su

$\varepsilon^{pl}$  stvarne plastične deformacije

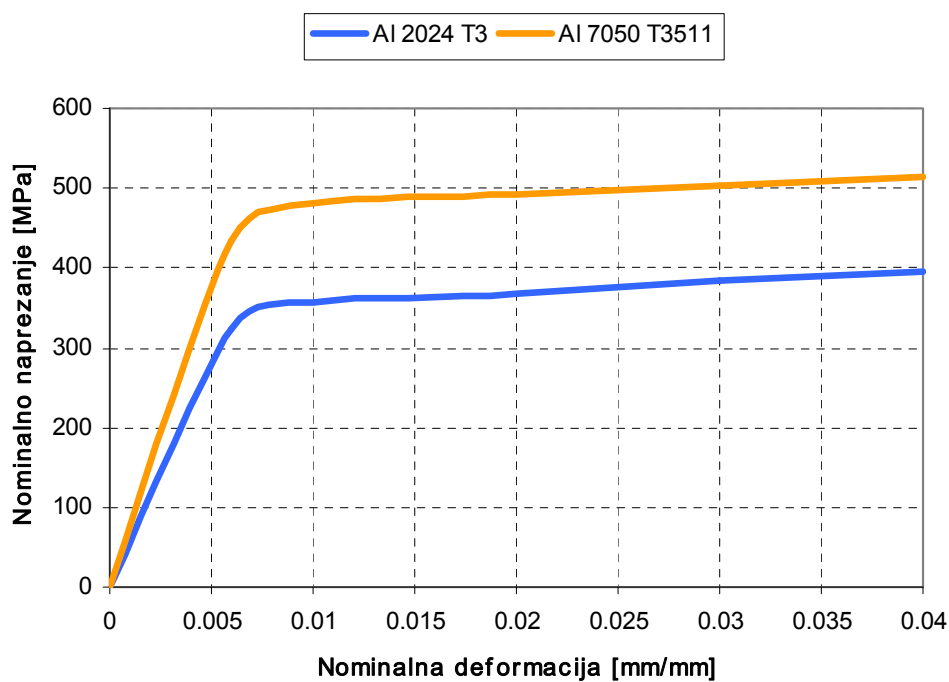
$\varepsilon^t$  stvarne ukupne deformacije

$\varepsilon^{el}$  stvarne elastične deformacije

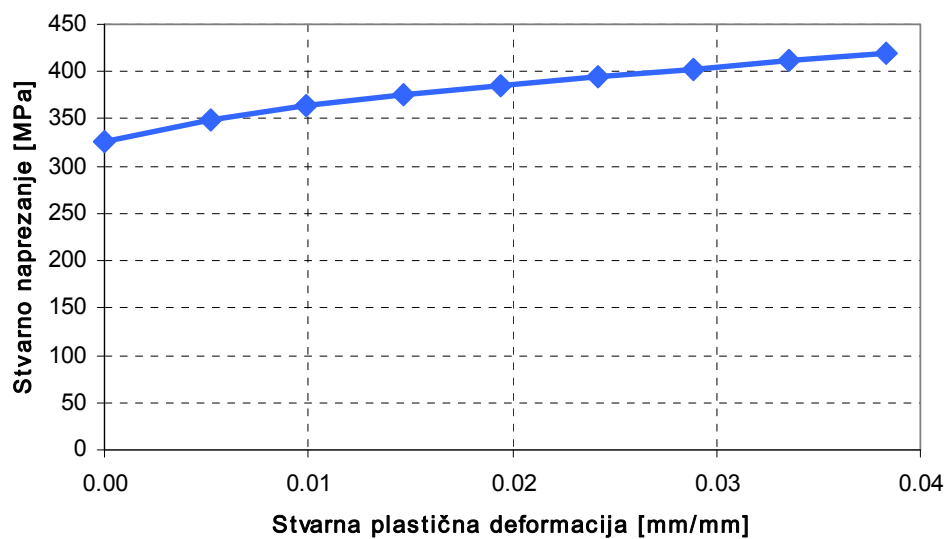
$\sigma$  stvarno naprezanje

$E$  modul elastičnosti

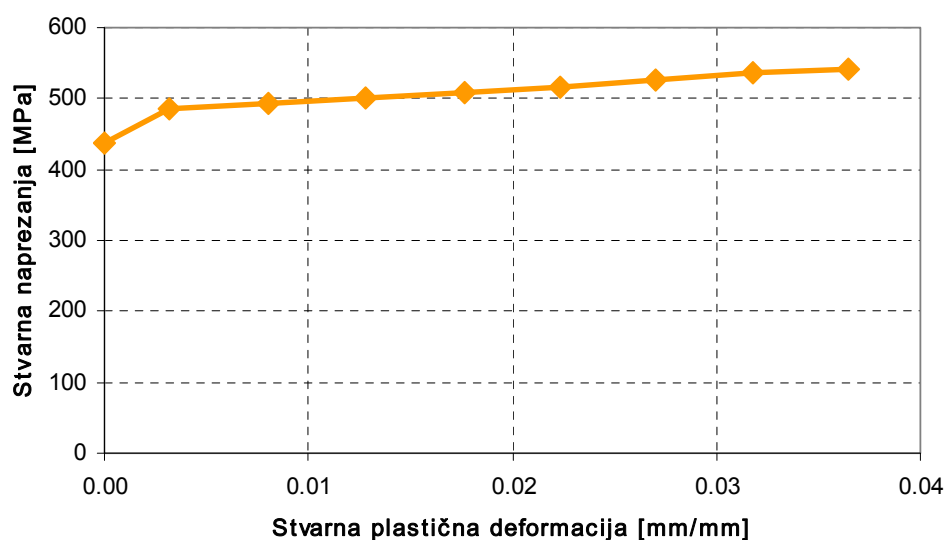
Nominalna naprezanja i deformacije za korištene materijale prikazani su na slici 3.3, a stvarna naprezanja i plastične deformacije na slikama 3.4 i 3.5.



Slika 3.3 Nominalni Hookeov dijagram za korištene materijale [8]



Slika 3.4 Stvarni Hookeov dijagram u ABAQUS-u – materijal Al 2024 T3



Slika 3.5 Stvarni Hookeov dijagram u ABAQUS-u – materijal Al 7050 T3511

## 4. Nelinearna eksplicitna dinamika

Promatrana analiza udara krutog tijela malom brzinom u zadanu sekciju trupa zrakoplova izvršena je u programu Abaqus/Explicit. Osnovni princip rada je objašnjen u nastavku.

Abaqus/Explicit koristi metodu središnjih diferencija za eksplicitnu integraciju jednadžbi gibanja, pri čemu se služi kinematičkim uvjetima u jednom inkrementu da bi iste izračunao u sljedećem inkrementu. Na početku inkrementa program rješava matričnu jednadžbu dinamičke ravnoteže:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{I} - \mathbf{P} = 0, \quad (12)$$

tj. ako se razlika  $\mathbf{P} - \mathbf{I}$  predstavlja kao skup svih sila u čvorovima mreže konačnih elemenata:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{P} - \mathbf{I} \quad (13)$$

gdje su je  $\mathbf{M}$  dijagonalna matrica mase u čvorovima,  $\ddot{\mathbf{u}}$  ubrzanja u čvorovima,  $\mathbf{P}$  vektor vanjskih opterećenja i  $\mathbf{I}$  vektor unutrašnjih sila u čvorovima.

Ubrzanja na početku trenutnog vremenskog inkrementa (vremena  $t$ ) se računaju kao:

$$\ddot{\mathbf{u}}_{(t)} = (\mathbf{M})^{-1} (\mathbf{P} - \mathbf{I})_{(t)} \quad (14)$$

Kao eksplicitna metoda uvijek koristi dijagonalnu matricu mase, rješavanje po ubrzanjima je trivijalno, budući da nema skupa jednadžbi koje treba istovremeno riješiti. Kako je iz izraza (14) vidljivo, ubrzanje bilo kojeg čvora je u potpunosti određeno njegovom masom i skupom sila koje djeluju na njega, što postupak proračuna bitno pojednostavljuje.

Ubrzanja se integriraju po vremenu upotrebom metode središnjih diferencija koje izračunava promjenu brzine pretpostavljajući konstantna ubrzanja. Ova promjena brzine se dodaje brzini u sredini prethodnog vremenskog inkrementa da bi se odredile brzine u sredini trenutnog vremenskog inkrementa.

$$\dot{\mathbf{u}}_{\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)} = \dot{\mathbf{u}}_{\left(t-\frac{\Delta t}{2}\right)} + \frac{\left(\Delta t\right|_{(t+\Delta t)} + \Delta t|_{(t)}\right)}{2} \ddot{\mathbf{u}}_{(t)} \quad (15)$$



Za izračunavanje pomaka na kraju inkrementa, brzine se integriraju po vremenu te dodaju pomacima na početku inkrementa:

$$\mathbf{u}|_{(t+\Delta t)} = \mathbf{u}|_{(t)} + \Delta t|_{(t+\Delta t)} \dot{\mathbf{u}}|_{\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)} \quad (16)$$

Stoga, zadovoljenjem dinamičke ravnoteže na početku inkrementa, dobivaju se ubrzanja. Poznavanje ubrzanja, brzina i pomaka predstavlja “eksplicitnost” po vremenu. Ova metoda točno integrira konstantna ubrzanja.

Da bi metoda polučila točne rezultate, vremenski inkrement je dosta malen, kako bio zadovoljen uvjet o konstantnim ubrzanjima tijekom inkrementa. Za većinu analiza potreban je veći broj inkrementa, koji može narasti i do nekoliko stotina. No kako je već spomenuto, ovo ne predstavlja veliki problem zbog toga što nije potrebno istovremeno rješavati skup jednadžbi. Većina računalnog vremena biva utrošena na određivanje unutrašnjih sila koje djeluju u čvorovima elemenata.

Proračun po elementima uključuje određivanje pomaka čvorova elementa i te definiranje krutosti elementa, da bi se izračunala naprezanja po elementima, te na osnovu njih unutrašnje sile.

Sljedeći prikaz daje sažeti oblik eksplicitne dinamike:

1. Proračun po čvorovima

a) Dinamička ravnoteža

$$\ddot{\mathbf{u}}_{(t)} = (\mathbf{M})^{-1} (\mathbf{P} - \mathbf{I})|_{(t)}$$

b) Eksplicitno integriranje po vremenu

$$\dot{\mathbf{u}}|_{\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)} = \dot{\mathbf{u}}|_{\left(t-\frac{\Delta t}{2}\right)} + \frac{\left(\Delta t|_{(t+\Delta t)} + \Delta t|_{(t)}\right)}{2} \ddot{\mathbf{u}}|_{(t)}$$

$$\mathbf{u}|_{(t+\Delta t)} = \mathbf{u}|_{(t)} + \Delta t|_{(t+\Delta t)} \dot{\mathbf{u}}|_{\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)}$$

2. Proračun po elementima

a) Proračun inkremenata deformacije,  $d\varepsilon$  pomoću brzine deformacije  $\dot{\varepsilon}$

b) Proračun naprezanja  $\sigma$  iz konstitutivnih izraza

$$\sigma_{(t+\Delta t)} = f(\sigma_{(t)}, d\varepsilon)$$

c) Određivanje unutarnjih sila po čvorovima  $\mathbf{I}|_{(t+\Delta t)}$

3. Postavljanje inkrementa s  $t$  na  $t + \Delta t$  te povratak na korak 1.

## Vremenski korak i stabilnost metode

Granicu stabilnosti metode uvjetuje najveći vremenski korak koji koristi rješavač Abaqus/Explicit-a te predstavlja faktor koji najviše utječe na performanse programa u eksplicitnoj metodi.

Kod modela koji sadrže samo jednu vrstu materijala, inicijalni vremenski inkrement je izravno proporcionalan veličini najmanjeg elementa u mreži.

Ako mreža sadrži jednolike elemente, ali više vrsta materijala, veličinu inicijalnog vremenskog inkrementa određuje element s najvećom valnom brzinom u materijalu  $c_d$ <sup>3</sup>.

$$c_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (17)$$

gdje su  $E$  modul elastičnosti materijala i njegova gustoća  $\rho$ .

Granica stabilnosti je dana preko najviše vlastite frekvencije sistema  $\omega_{\max}$  kao [6]:

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}} \quad (\text{bez prigušenja}) \quad (18)$$

U Abaqus/Explicit metodu uvedena je mala količina prigušenja zbog kontrole visokofrekventnih oscilacija. S dodanim je prigušenjem stabilni vremenski inkrement jednak:

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}} \left( \sqrt{1 + \xi^2} - \xi \right) \quad (19)$$

gdje je  $\xi$  dio kritičnog prigušenja u modu s najvišom vlastitom frekvencijom<sup>4</sup>.

U praktičnom proračunu umjesto izračuna granice stabilnosti pomoću izraza (18) tj. (19), program vrši njenu procjenu.

<sup>3</sup> Za linearno elastični materijal

<sup>4</sup> Kod slobodnih oscilacija kritično prigušenje definira granicu između vibracijskog i nevibracijskog gibanja.

Procjena je konzervativna i dana je minimumom nad svim elementima. Ova granica stabilnosti se može zapisati kao:

$$\Delta t = \min \left( \frac{L_e}{c_d} \right), \text{ tj.}$$

$$\Delta t \approx \frac{L_{e,min}}{c_d} \quad (20)$$

gdje je  $L_e$  karakteristična dimenzija elementa, a  $c_d$  trenutna efektivna brzina vala u materijalu.

Karakteristična dimenzija elementa izvedena je od analitičkog izraza za gornju granicu maksimalne vlastite frekvencije elementa.

Općenito se, za grede, konvencionalne (2-dimenzionalne) ljuske i membrane, debljina elementa ne razmatra pri određivanju njegove najmanje dimenzije; granica stabilnosti je temeljena samo na srednjoj ravnini, ili dimenziji membrane. Stvarni stabilni vremenski inkrement odabran od Abaqus/Explicit biti će manji od približne procjene za faktor između  $1/\sqrt{2}$  i 1 za 2-dimenzionalan model te između  $1/\sqrt{3}$  i 1 za 3-dimenzionalan model.

Nelinearni problemi s velikim deformacijama i/ili nelinearnim odzivom materijala imaju najvišu frekvenciju modela koja se kontinuirano mijenja, što naposljetku mijenja granicu stabilnosti.

Određivanje vremenskog koraka u Abaqus/Explicit može biti potpuno automatizirano od strane samog programa te ne zahtijeva intervenciju korisnika (program računa promjene granice stabilnosti), ili korisnik može zadati unaprijed određeni, nepromjenjivi korak.

U ovom je radu korišten automatska vremenski korak, jer je za pokušaj ručnog određivanja stabilnog vremenskog inkrementa dobivena greška; inkrement je bio veći od onog koji je program dodijelio te analiza nije izvršena zbog prevelike valne brzine u materijalu.

Materijal utječe na granicu stabilnosti promjenom brzine širenja vala. Kako metal postaje plastičan (nelinearno područje), krutost mu se mijenja. Abaqus/Explicit prati efektivnu brzinu vala u modelu tijekom analize te se za procjenu granice stabilnosti koristi trenutno stanje materijala u svakom konačnom elementu.

Kako je vidljivo iz izraza (20) za granicu stabilnosti također je bitna veličina mreže, tj. najkraća dimenzija nekog elementa u mreži.

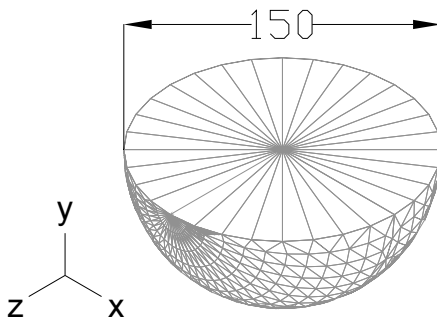
Stoga je potrebno uskladiti proturječne zahtjeve, s jedne strane rjeđa mreža pogoduje većoj granici stabilnosti te smanjuje numeričku zahtjevnost modela, dok je finija mreža ponekad poželjna zbog boljeg opisivanja raspodjele izlaznih veličina – naprezanja, deformacija, energija i sl.

Da bi se ostvario takav kompromis, mreža korištena u radu je jednolike veličine elemenata.

U procesu isprobavanja mreža za model, došlo je do neprimjetnog stvaranja nekoliko elemenata izrazito malih dimezija, reda veličine  $10^{-3}$  mm. Ostatak mreže je imao elemente prosječne veličine  $\sim 40$  mm. Pokretanjem analize, stabilni vremenski inkrement je iznosio oko  $10^{-8}$  s. Nakon popravka mreže, stabilni vremenski inkrement je iznosio oko  $10^{-7}$  s, što je značajno smanjilo i ukupno vrijeme analize (s otprilike 20 h na oko 3 h).

## Kontaktna mehanika modela

Dinamička nelinearna analiza koja je provedena na modelu izvršena je kao simulacija udara krutog tijela male brzine u različita područja vanjske oplata trupa zrakoplova. Prema dobivenim podacima iz izvora [2] zemaljska oprema koja izaziva oštećenja zamijenjena je analitički krutim udaračem, oblika polukugle promjera 150 mm, mase 50 kg, a mjesta udara su birana tako da pokriju tri različite debljine oplata: 1.6, 4 i 6 mm.



Slika 4.1 Dimenzije i orijentacija udarača u globalnom koordinatnom sustavu

Upotreba analitički krutog tijela je opravdana time [6] što zemaljska oprema koja izaziva oštećenja ima znatno veću krutost od konstrukcije trupa, za definiranje kinematike i samog kontakta takvog tijela potrebno je odrediti samo jednu referentnu točku čiji je relativni položaj konstantan u odnosu na ostale točke tijekom gibanja (njoj su dodijeljena masa i brzina koji se odnose na cijelo tijelo), vanjska površina takvog tijela sudjeluje u kontaktu s deformabilnom vanjskom površinom trupa.

Sa stajališta trajanja analize, za ovakvo tijelo ne treba vršiti proračun konačnih elemenata, za razliku od npr. deformabilnog udarača, čime se skraćuje vrijeme proračuna.

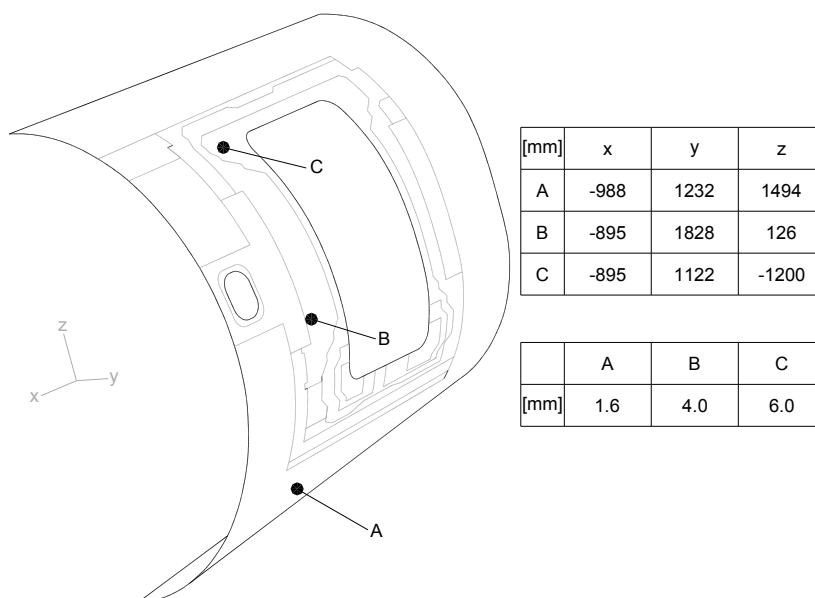
Dovoljno točno modeliranje dijela stvarne udaračke površine kao pulukugle je znatno jednostavnije i kraće od modeliranja cijelog zemaljskog vozila.

Kontakt između udarača i oplata je izveden preko dvije površine (*Surface to surface contact*); primarne nedeformabilne koju predstavlja vanjska površina udarača i sekundarne deformabilne, koju predstavlja vanjska površina oplata.

## 5. Analiza konstrukcije

Zbog simetričnosti konstrukcije u vertikalnoj  $x - z$  ravnini analizirana je samo njena desna polovina. Opterećenje je definirano kao udar ranije opisanog analitički krutog udarača u tri mjesta na konstrukciji, točke A, B i C (slika 5.1). Ispitivan je odziv konstrukcije pri brzinama udarača od 0.5 m/s i 1 m/s.

Trajanje analize (*Time Step*) koje je prikazano na dijagramima pomaka za točke udara i energija je odabrano tako da odgovara vremenskom intervalu u kojem je došlo do deformacija konstrukcije. Za slučaj udara u oplatu debljine 1.6 mm iznosi 60 ms, dok za ostale slučajeve brzina i mjesta udara promatrano 40 ms analize.

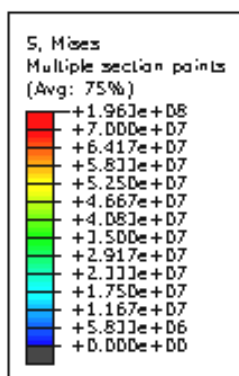
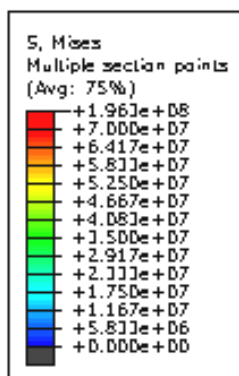
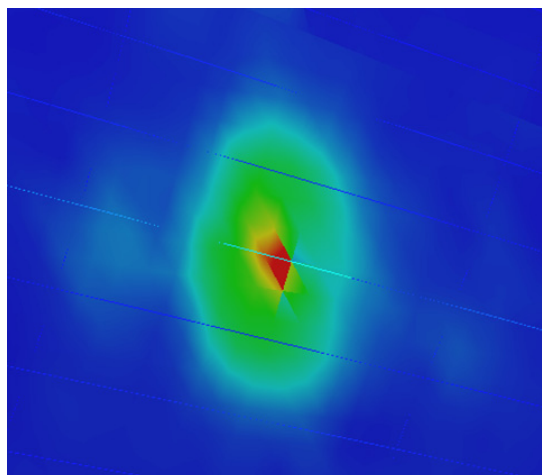
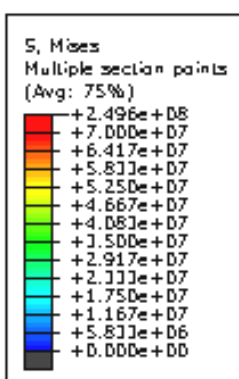
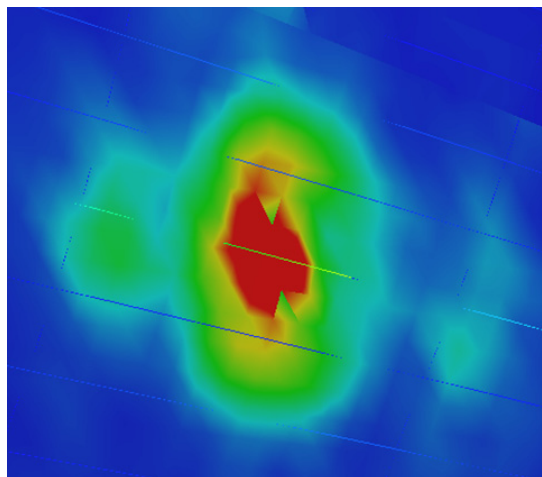
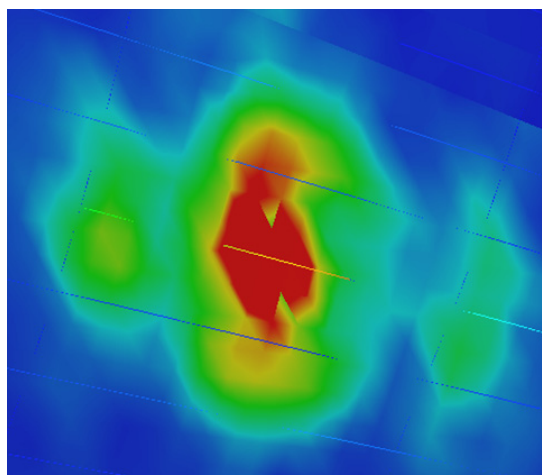


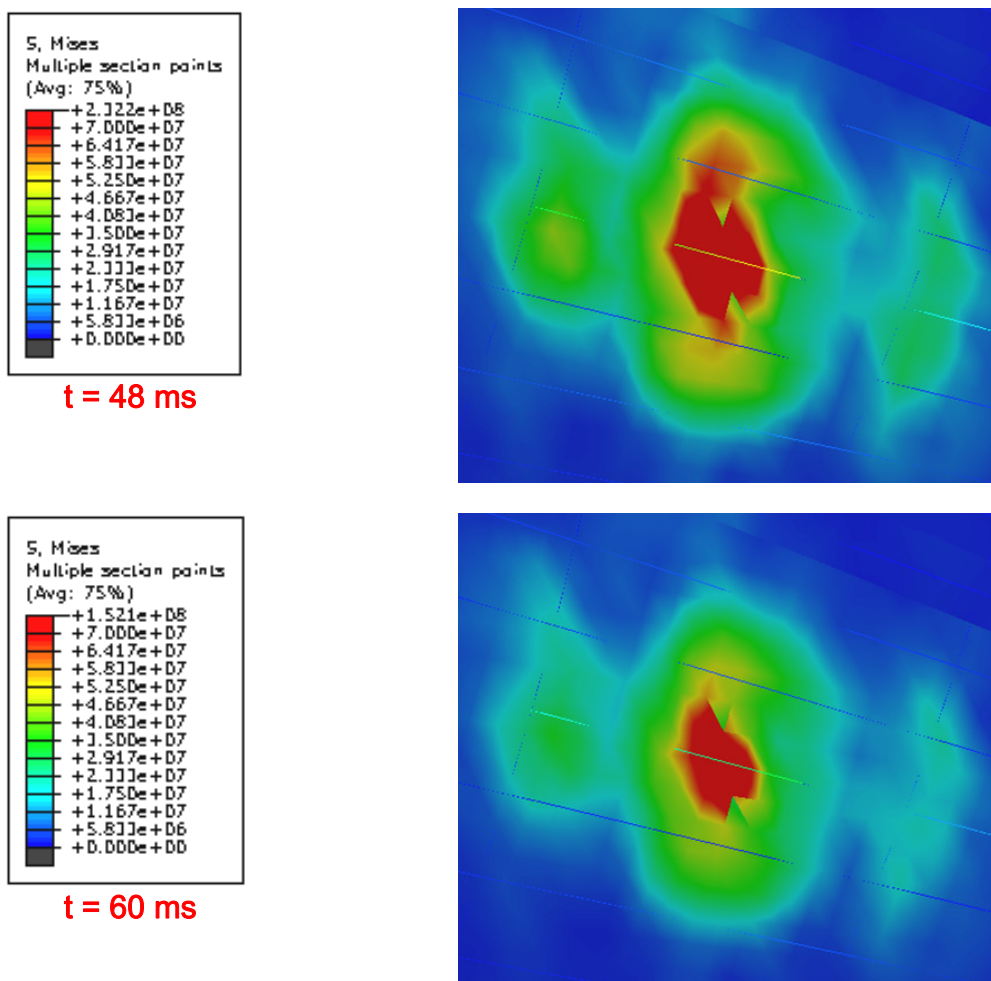
Slika 5.1 Prikaz sva tri položaja udarača i mjesta udara u konstrukciju

Rubni uvjeti su postavljeni na sljedeći način:

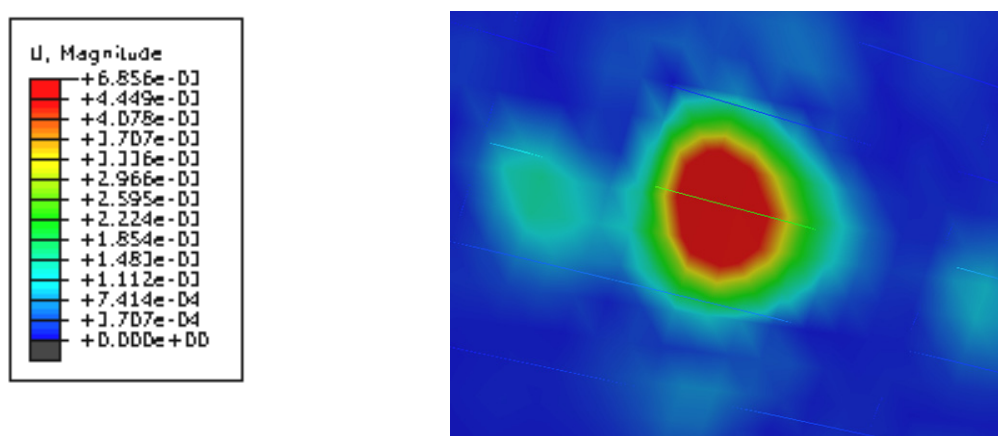
- u ravnini simetrije  $x - z$  za gornji i donji konstrukcije spriječeni stupnjevi slobode gibanja su translacija duž osi  $x$  i  $y$  te rotacije oko osi  $x$  i  $z$
- u ravnini  $y - z$  na sekciji trupa C64 [4] i ravnini paralelnoj ovoj ravnini (sekcija trupa C70) spriječeni stupnjevi slobode gibanja su translacija duž osi  $x$  te rotacije oko osi  $y$  i  $z$
- na mjestu učvršćenja podnice s konstrukcijom trupa na mjestu uzdužnice P'23 spriječeni su svi stupnjevi slobode gibanja (uklještenje)
- na mjestima oslabljenja konstrukcije zbog izreza otvora za vrata i prozor, rubni uvjeti su aproksimirani kao spriječeni pomak konstrukcije u smjeru osi  $y$
- udaraču su osim translacije u smjeru osi  $y$  ograničeni svi ostali stupnjevi slobode gibanja

## Rezultati analize

**t = 12 ms****t = 24 ms****t = 36 ms**

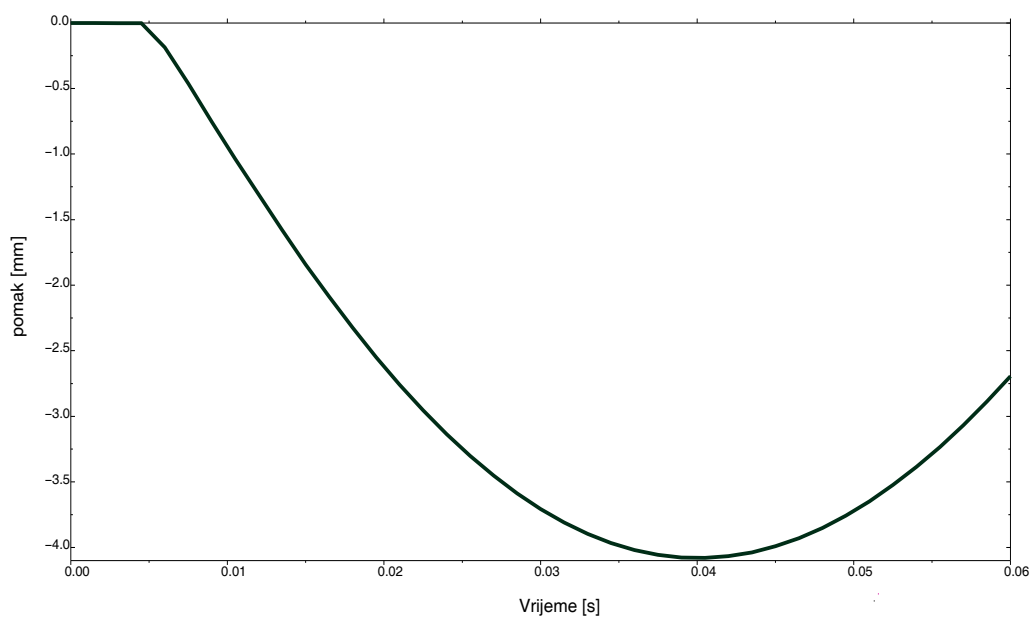


Slika 5.2 Raspodjela ekvivalentnog Von Mises naprezanja za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 0.5 m/s u oplatu debljine 1.6 mm

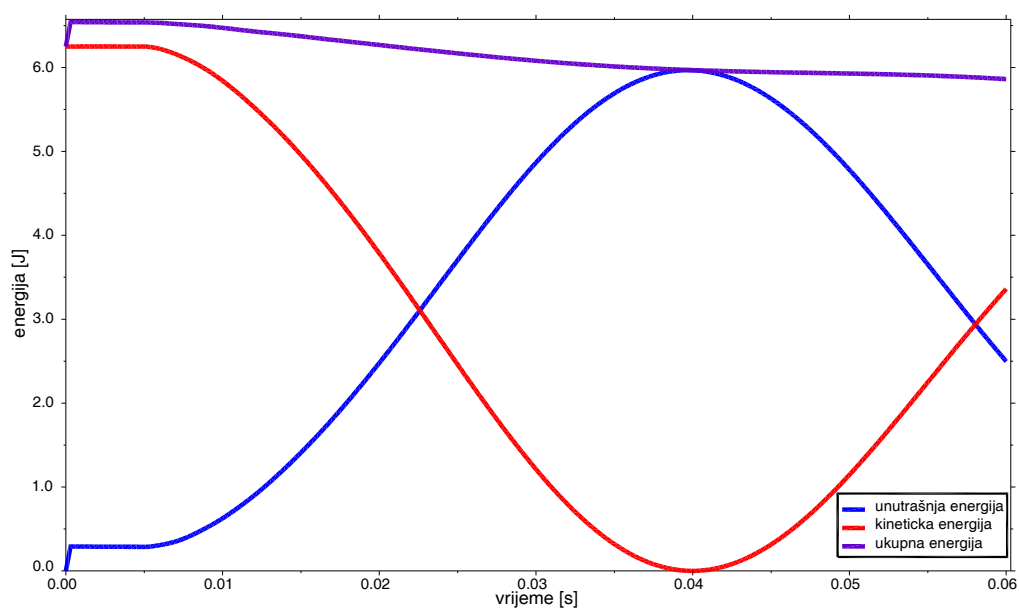


Slika 5.3 Raspodjela veličine pomaka na mjestu udara pri brzini udarača od 0.5 m/s u oplatu debljine 1.6 mm





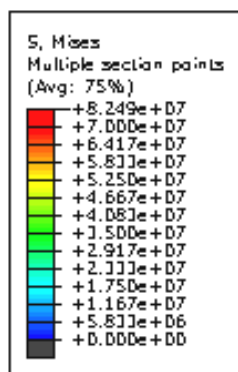
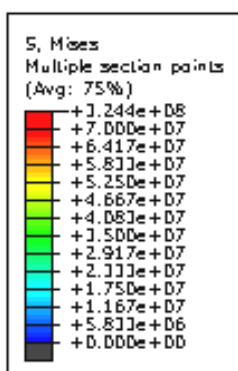
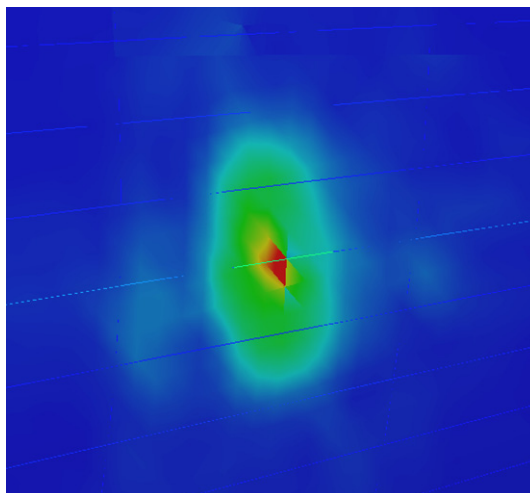
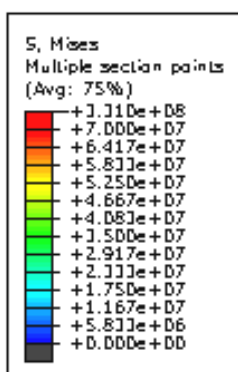
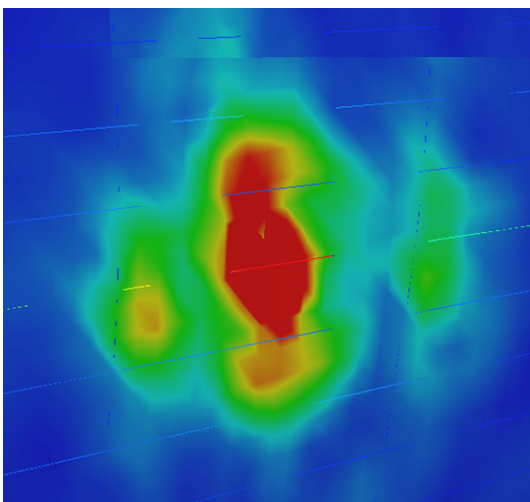
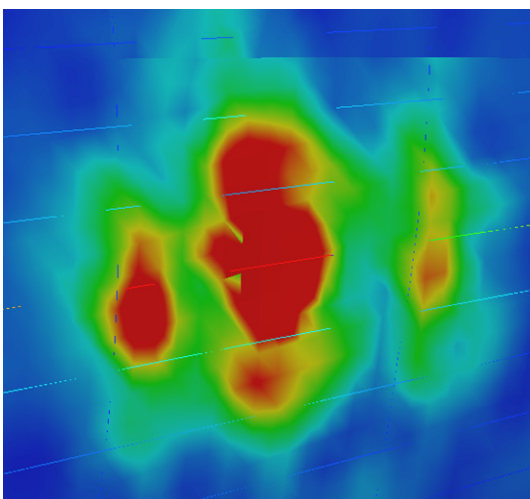
**Slika 5.4 Raspodjela pomaka točke udara „A“ za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 0.5 m/s u lim debljine 1.6 mm**

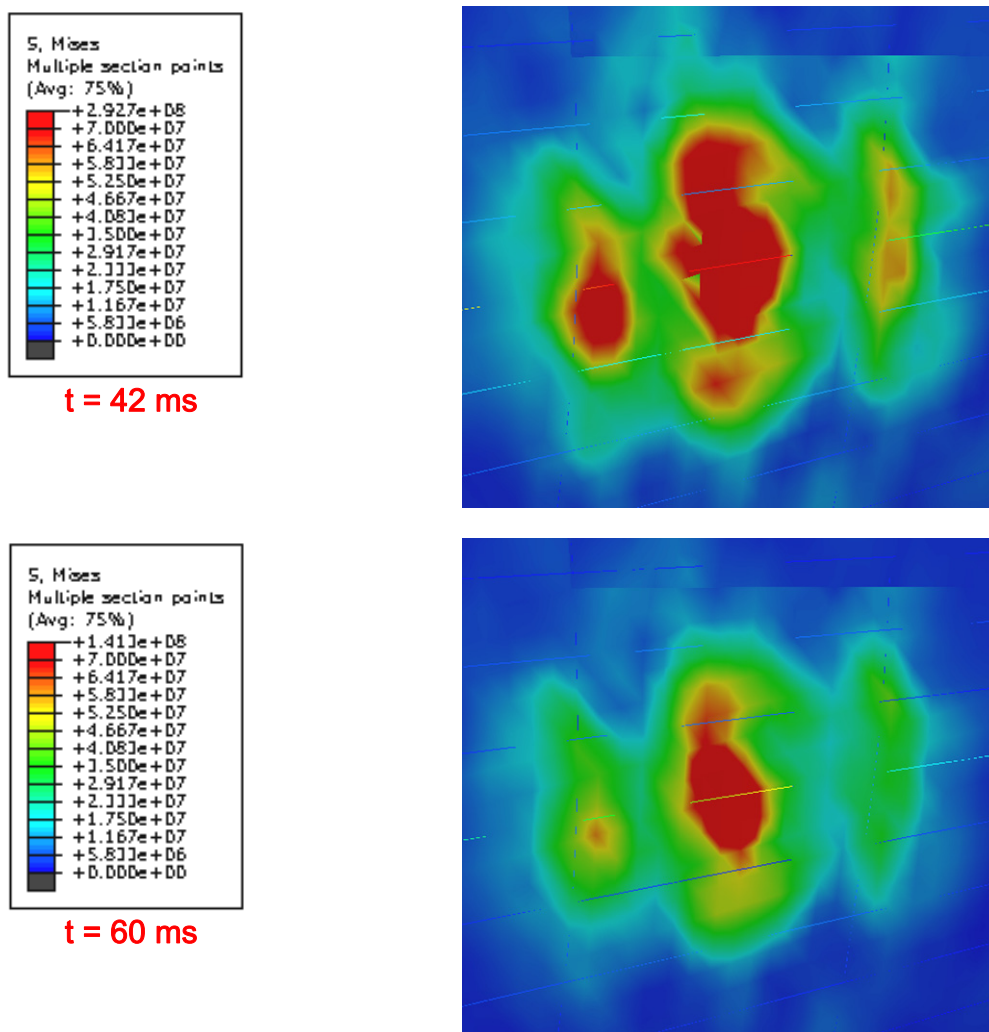


**Slika 5.5 Raspodjela ukupne, unutrašnje i kinetičke energije za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 0.5 m/s u lim debljine 1.6 mm**

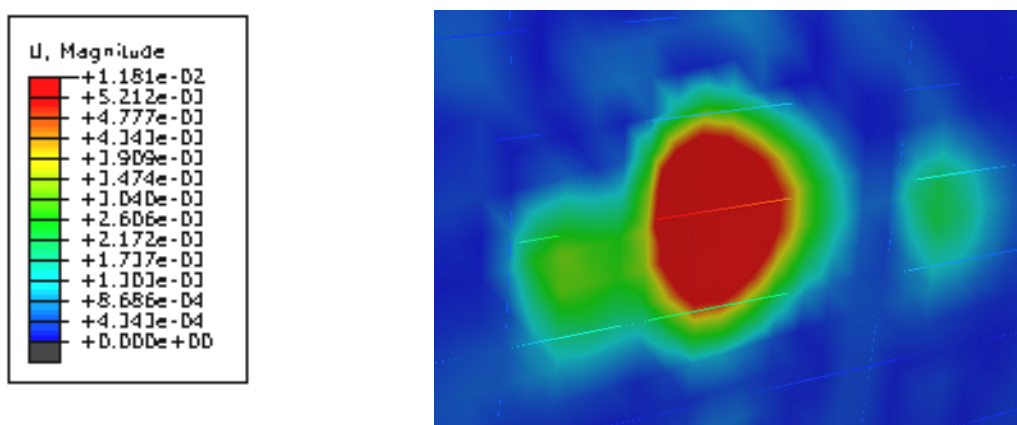
Iz prikaza ekvivalentnih von Mises naprezanja prema je vidljivo da maksimalna naprezanja ne dostižu granicu plastičnosti nijednog od materijala (iznose oko 250 Mpa), već dolazi do elastičnog povrata konstrukcije.

Maksimalan pomak točke udara konstrukcije iznosi (slika 5.4) oko 4.2 mm.

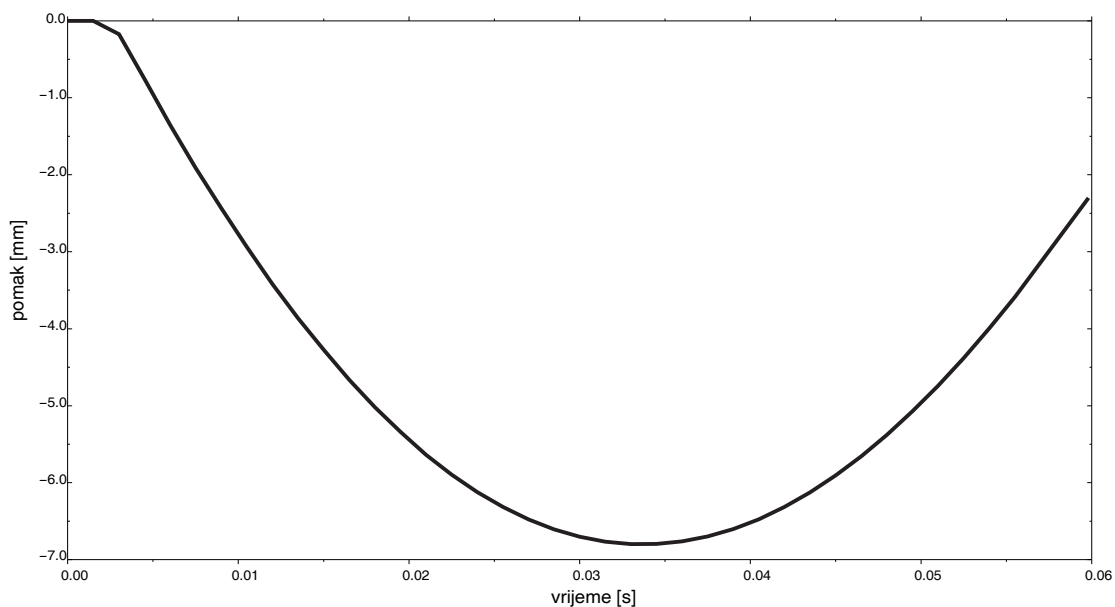
**t = 6 ms****t = 18 ms****t = 30 ms**



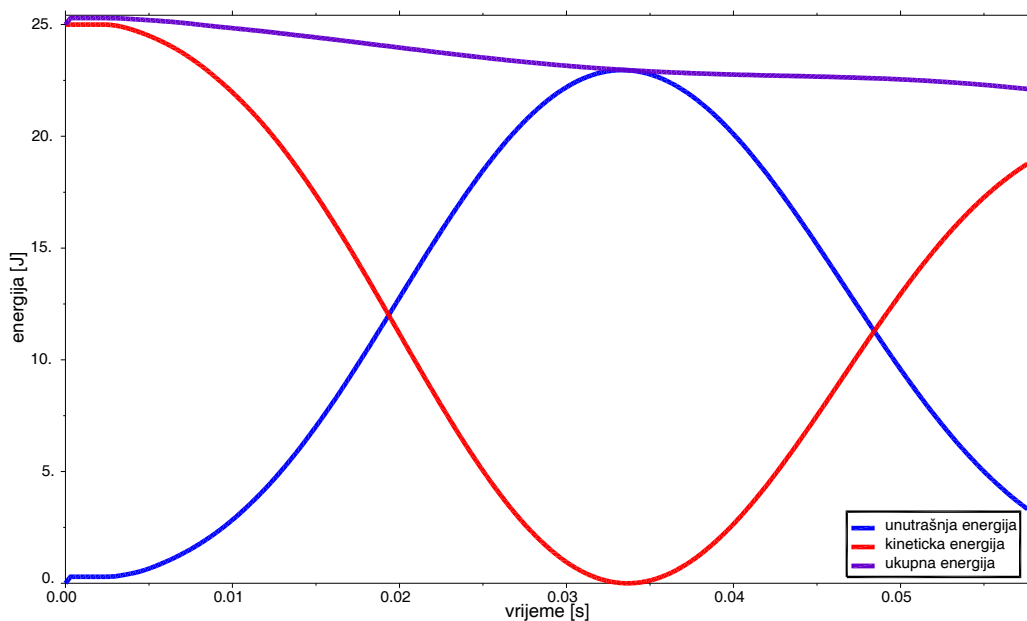
Slika 5.6 Raspodjela ekvivalentnog Von Mises naprezanja za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 1 m/s u oplatu debljine 1.6 mm



Slika 5.7 Raspodjela veličine pomaka na mjestu udara pri brzini udarača od 1 m/s u oplatu debljine 1.6 mm



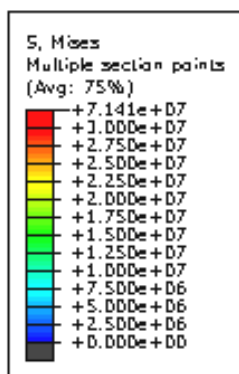
**Slika 5.8 Raspodjela pomaka točke udara „A“ za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 1 m/s u lim debljine 1.6 mm**



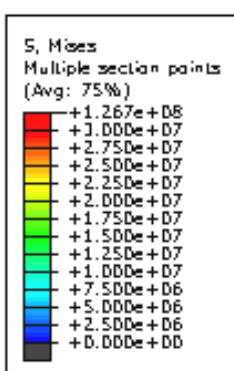
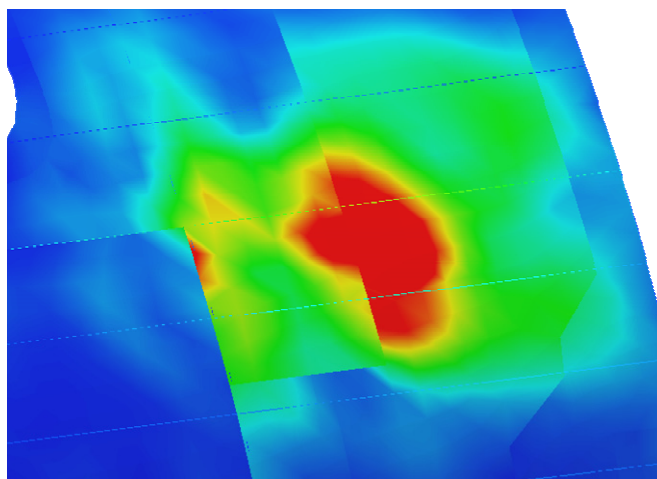
**Slika 5.9 Raspodjela ukupne, unutrašnje i kinetičke energije za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 1 m/s u lim debljine 1.6 mm**

Maksimalna vrijednost ekvivalentnih von Mises naprezanja iznosi oko 330 MPa, malo više od granice plastičnosti materijala Al 2024 T3511 (tablica 1).

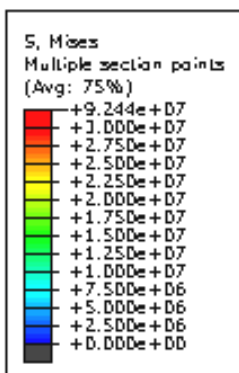
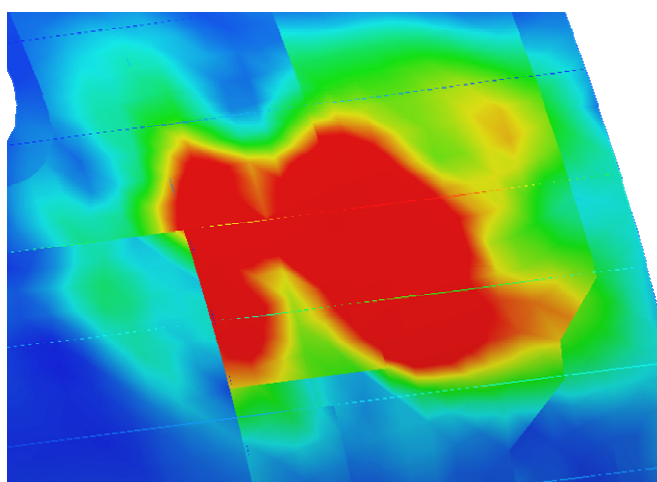
Maksimalan pomak točke udara konstrukcije iznosi oko 6.5 mm; događa 5 ms ranije nego maksimum kod brzine 0.5 m/s.



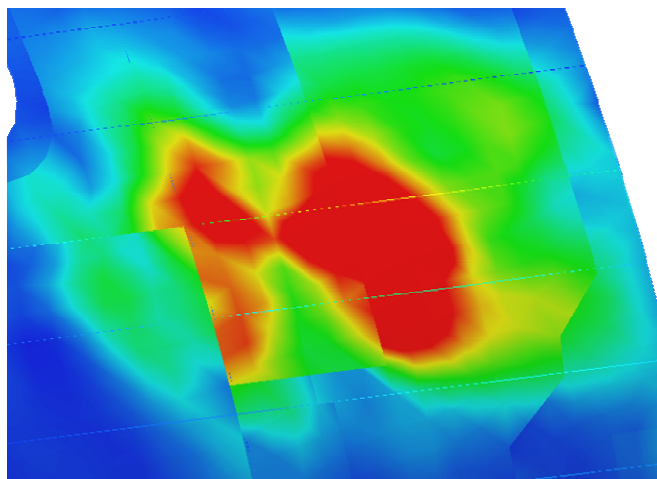
**t = 27 ms**

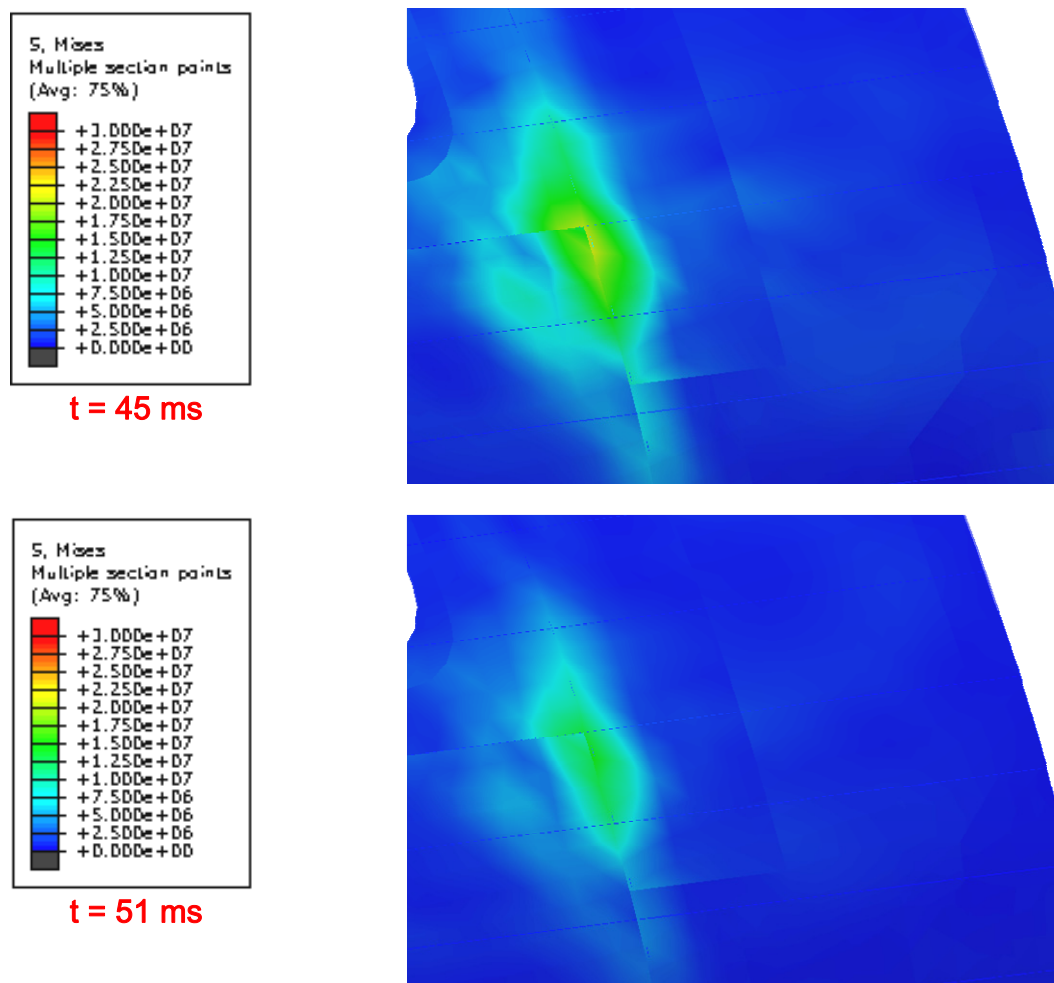


**t = 33 ms**

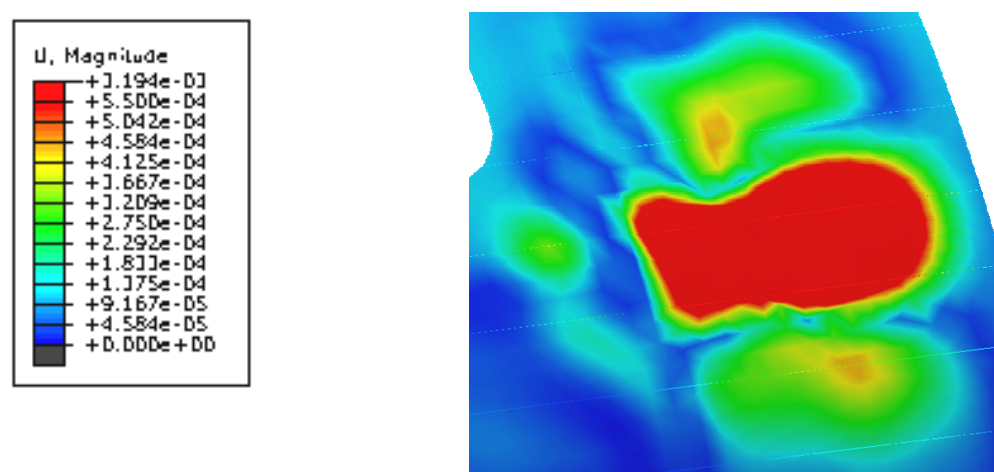


**t = 39 ms**

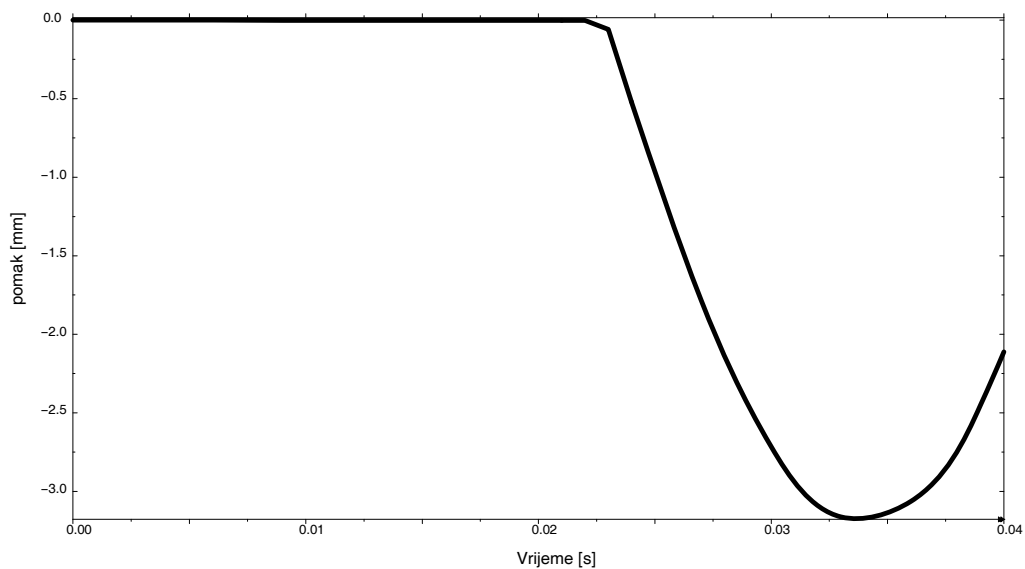




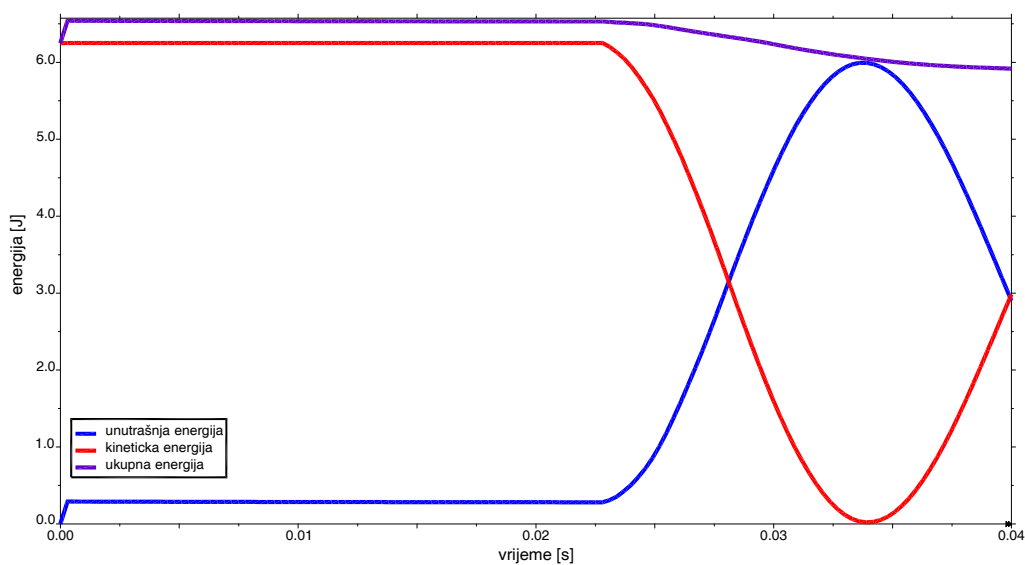
Slika 5.10 Raspodjela ekvivalentnog Von Mises naprezanja za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 0.5 m/s u oplatu debljine 4 mm



Slika 5.11 Raspodjela veličine pomaka na mjestu udara pri brzini udarača od 0.5 m/s u oplatu debljine 4 mm



**Slika 5.12 Raspodjela pomaka točke udara „B“ za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 0.5 m/s u lim debljine 4 mm**

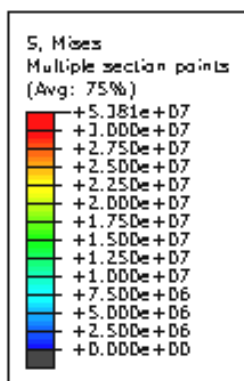
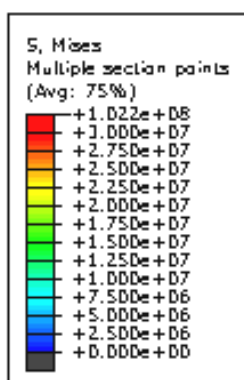
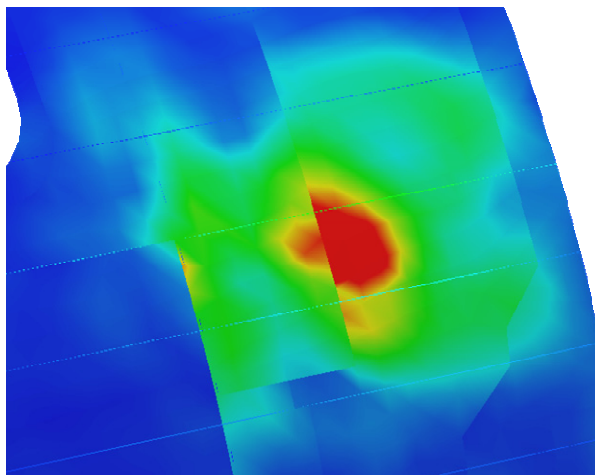
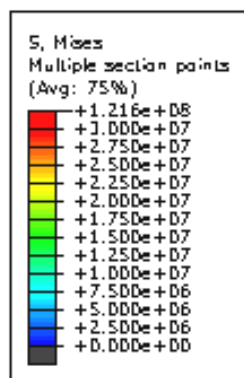
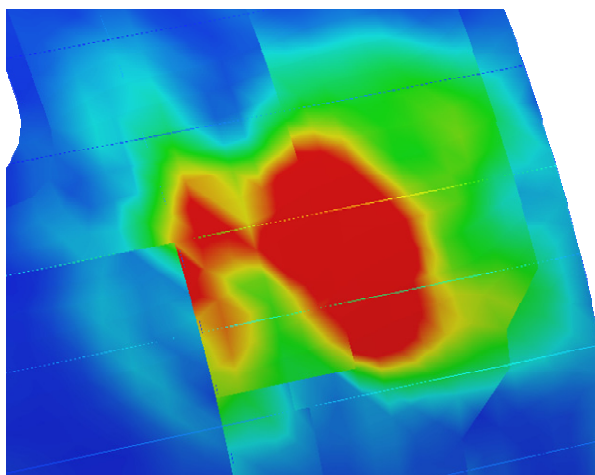
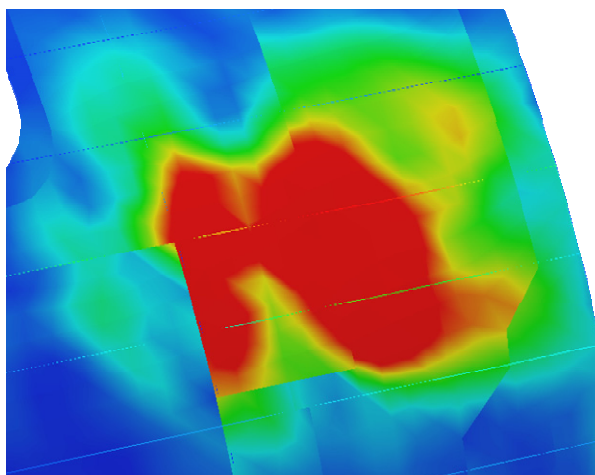


**Slika 5.13 Raspodjela ukupne, unutrašnje i kinetičke energije za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 0.5 m/s u lim debljine 4 mm**

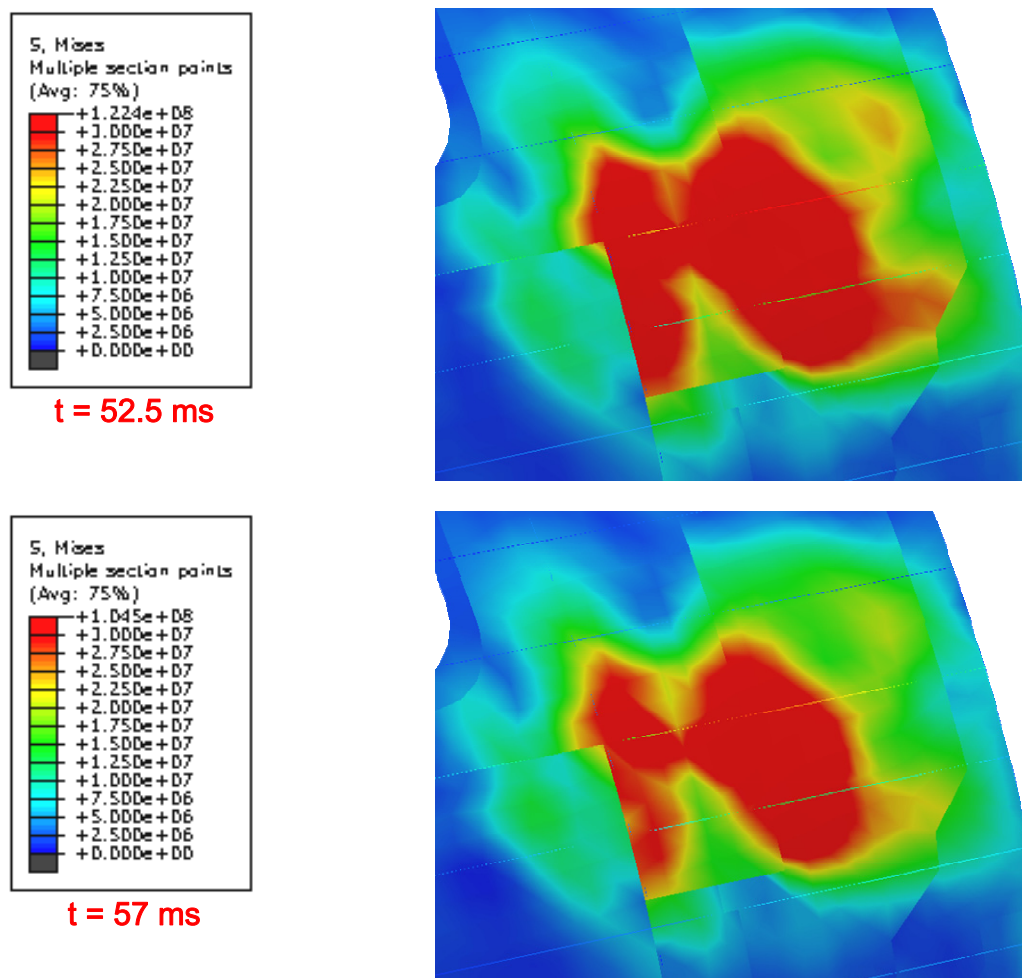
Raspodjela maksimalnih ekvivalentnih von Mises naprezanja ne prelazi granice plastičnosti oba materijala, za ovaj slučaj iznosi oko 127 MPa.

Maksimalan pomak točke udara konstrukcije iznosi oko 3.2 mm.

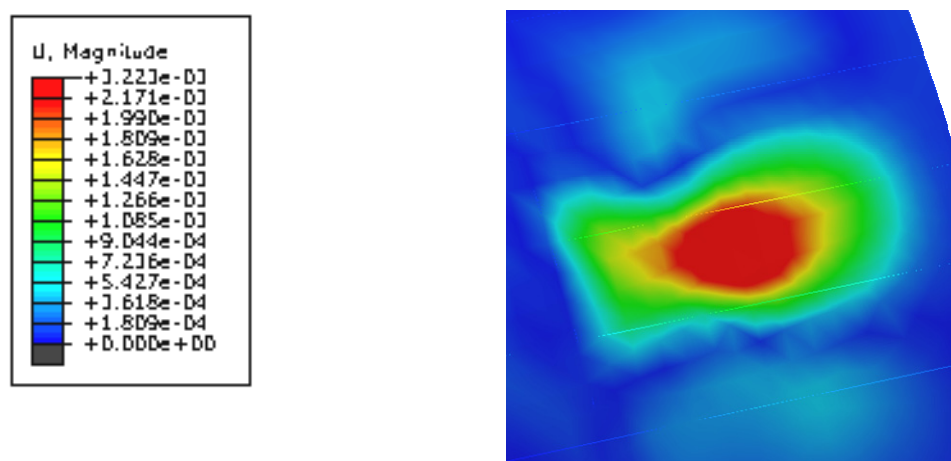


**t = 39 ms****t = 43.5 ms****t = 48 ms**

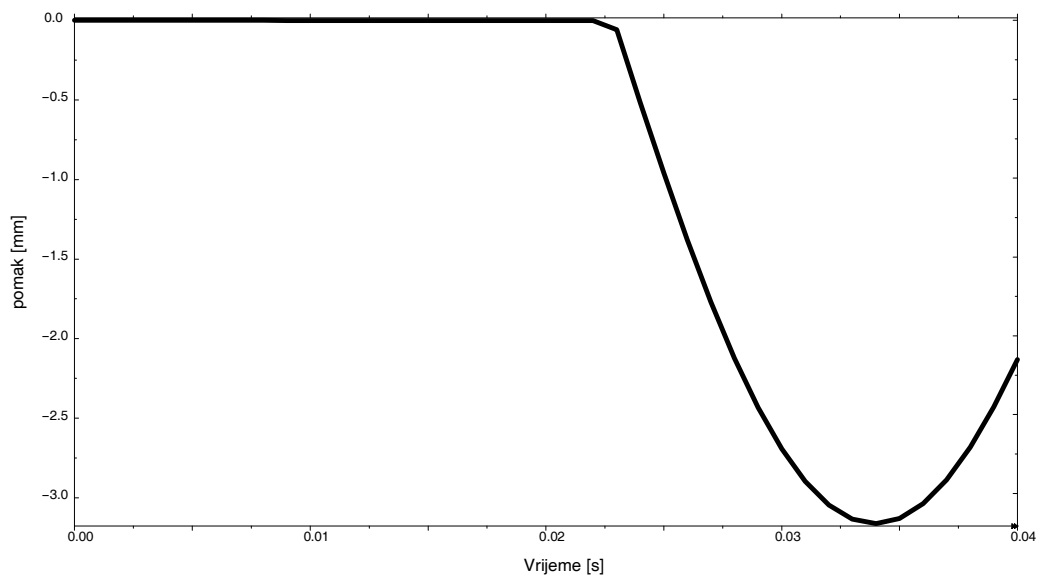




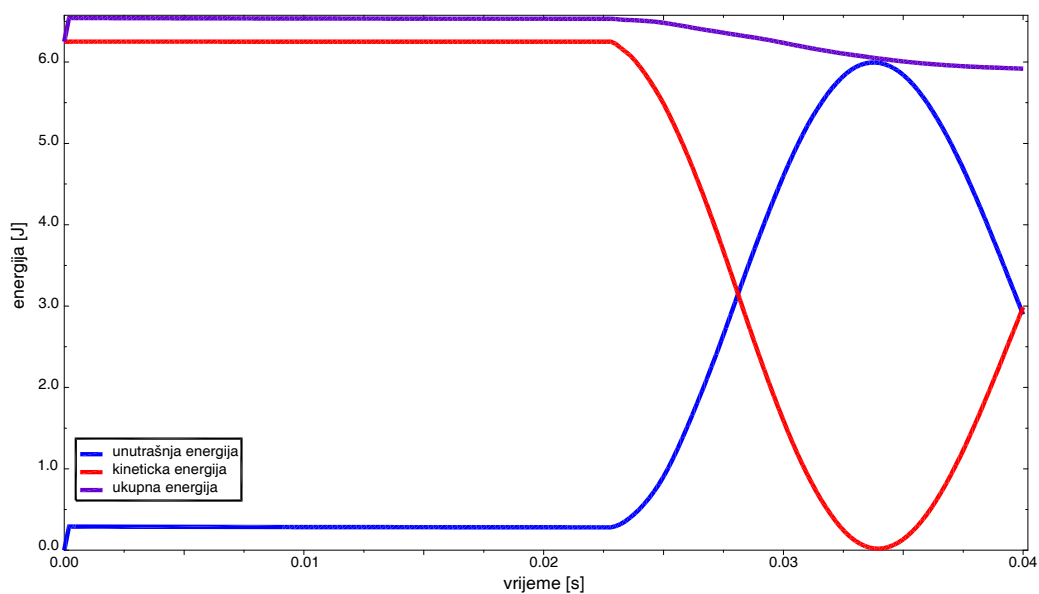
Slika 5.14 Raspodjela ekvivalentnog Von Mises naprezanja za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 1 m/s u oplatu debljine 4 mm



Slika 5.15 Raspodjela veličine pomaka na mjestu udara pri brzini udarača od 1 m/s u oplatu debljine 4 mm



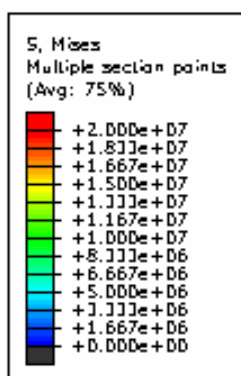
**Slika 5.16 Raspodjela pomaka točke udara „B“ za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 1 m/s u lim debljine 4 mm**



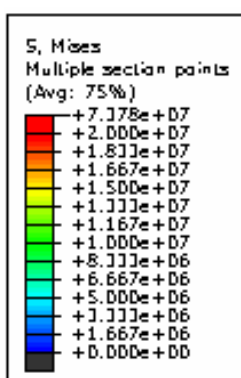
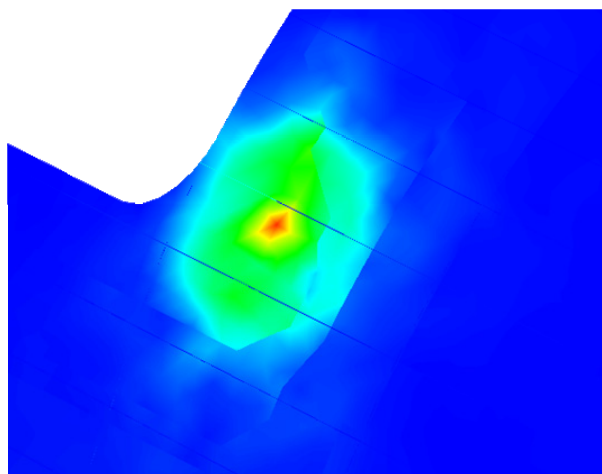
**Slika 5.17 Raspodjela ukupne, unutrašnje i kinetičke energije za trajanje analize od 60 ms pri brzini udarača 1 m/s u lim debljine 4 mm**

Maksimalna ekvivalentna von Mises naprezanja iznose 122 MPa; manja su od granica plastičnosti oba materijala.

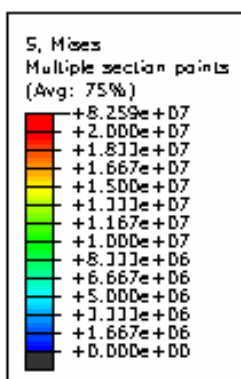
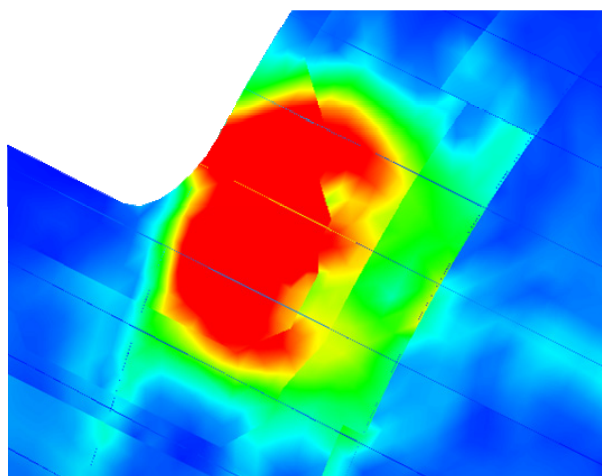
Maksimalan pomak točke udara konstrukcije iznosi također oko 3.2 mm.



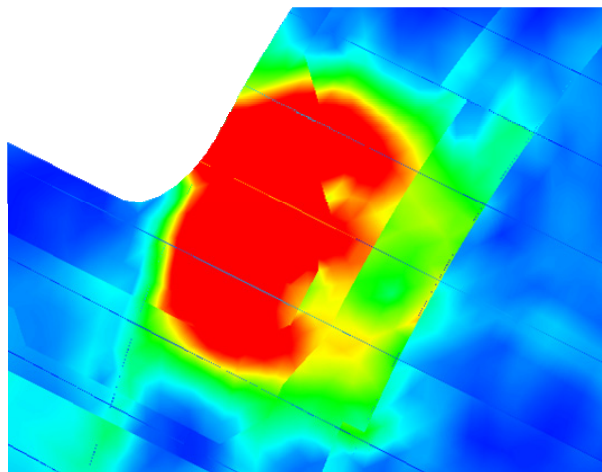
**t = 21.25 ms**

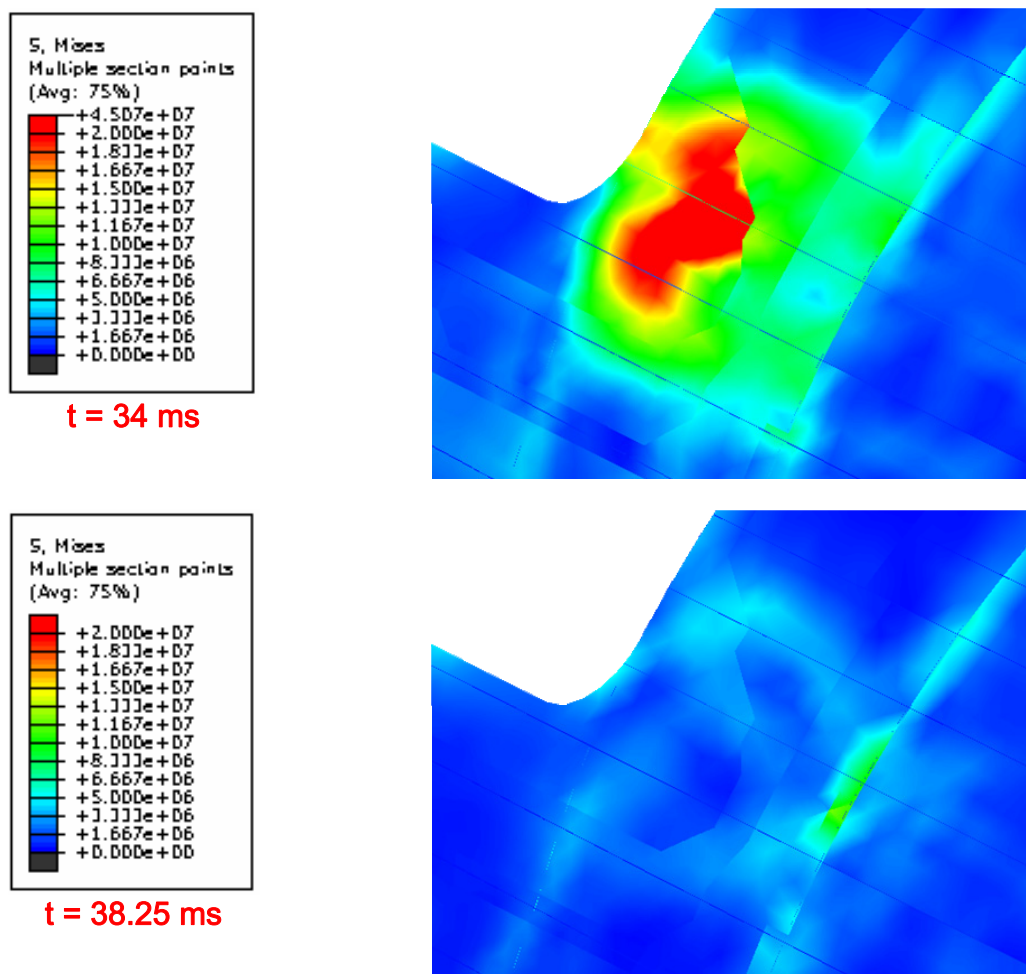


**t = 25.5 ms**

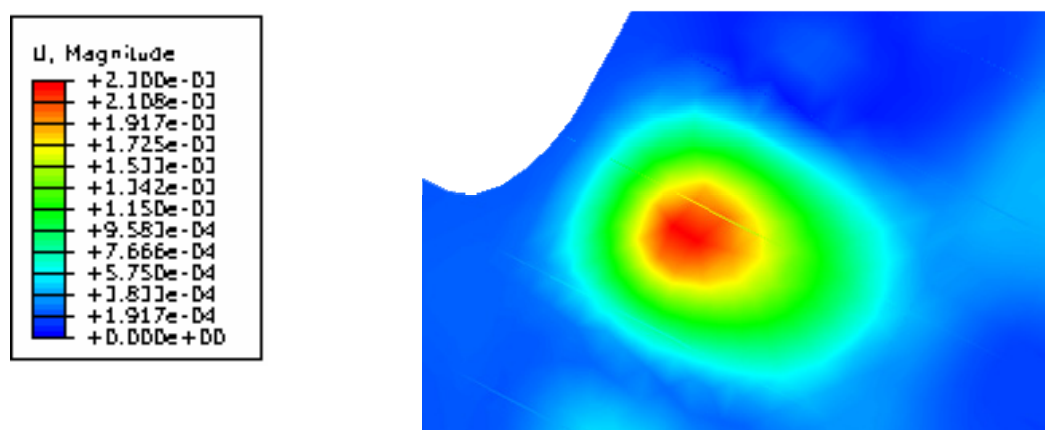


**t = 29.75 ms**

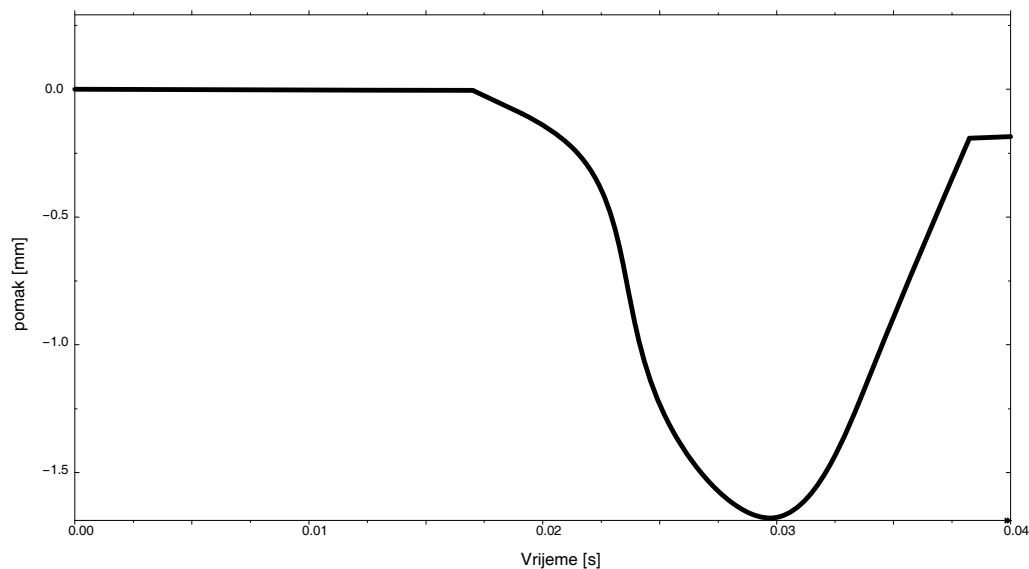




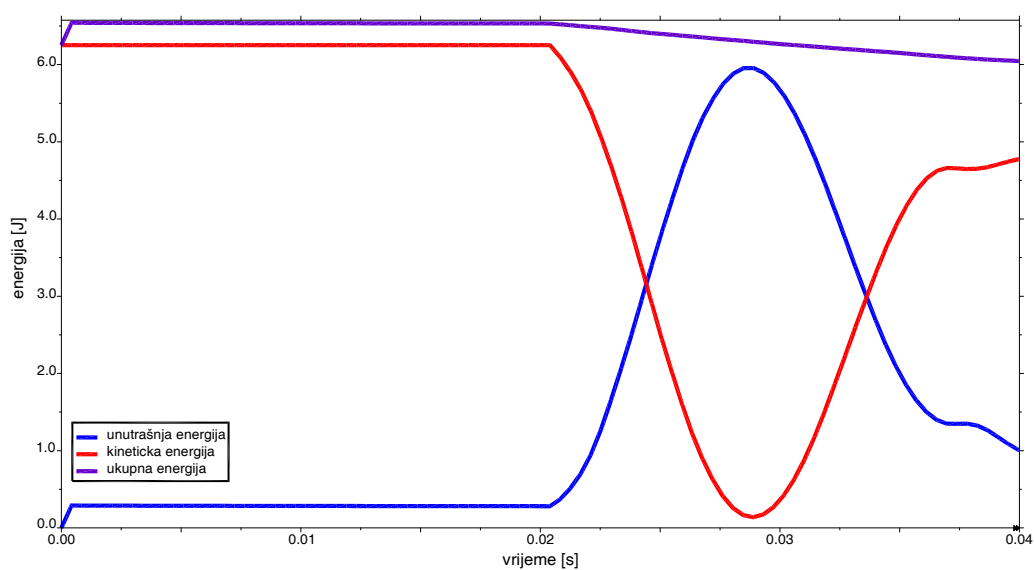
Slika 5.18 Raspodjela ekvivalentnog Von Mises naprezanja za trajanje analize od 85 ms pri brzini udarača 0.5 m/s u oplatu debljine 6 mm



Slika 5.19 Raspodjela veličine pomaka na mjestu udara pri brzini udarača od 0.5 m/s u oplatu debljine 6 mm



**Slika 5.20 Raspodjela pomaka točke udara „C“ za dio analize<sup>5</sup> trajanja 40 ms pri brzini udarača 0.5 m/s u lim debljine 6 mm**

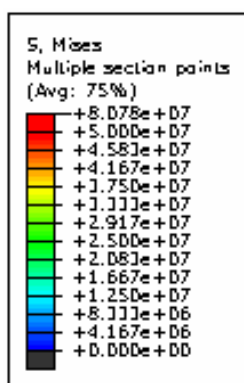


**Slika 5.21 Raspodjela ukupne, unutrašnje i kinetičke energije za dio analize trajanja 40 ms pri brzini udarača 0.5 m/s u lim debljine 6 mm**

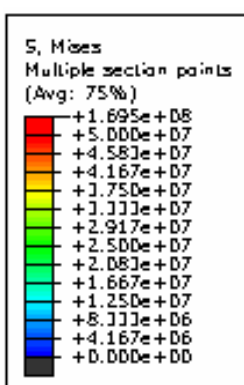
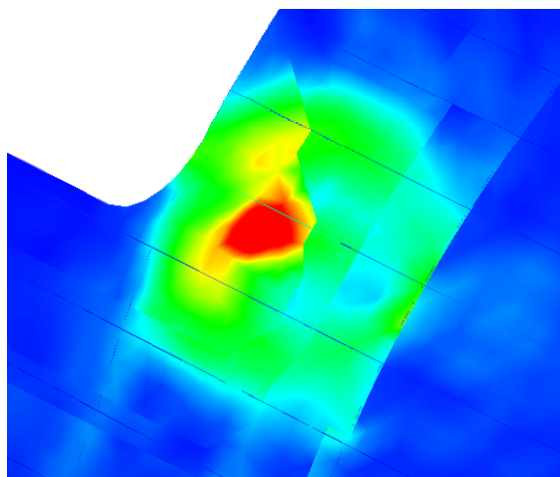
Maksimalna ekvivalentna von Mises naprezanja ne prelaze granice plastičnosti, iznose oko 83 MPa.

Maksimalan pomak točke udara konstrukcije iznosi oko 1.7 mm.

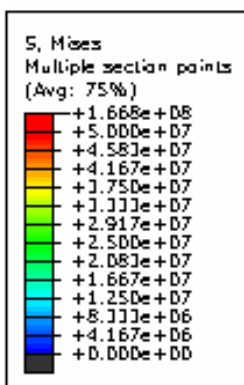
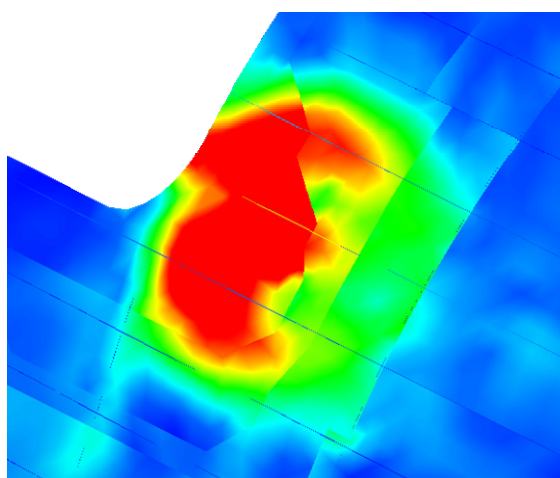
<sup>5</sup> Ukupno trajanje analize za ovaj slučaj iznosi 85 ms.



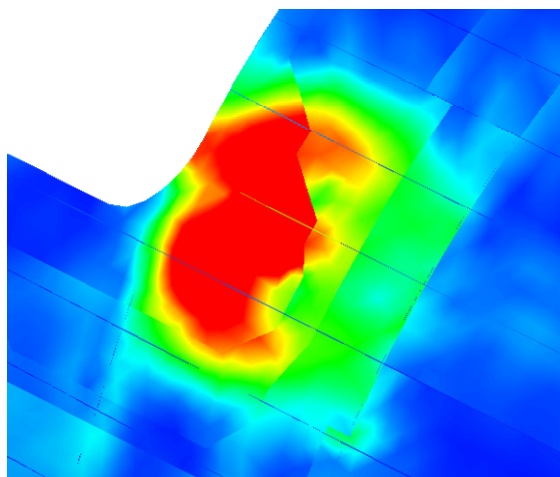
$t = 12.75 \text{ ms}$



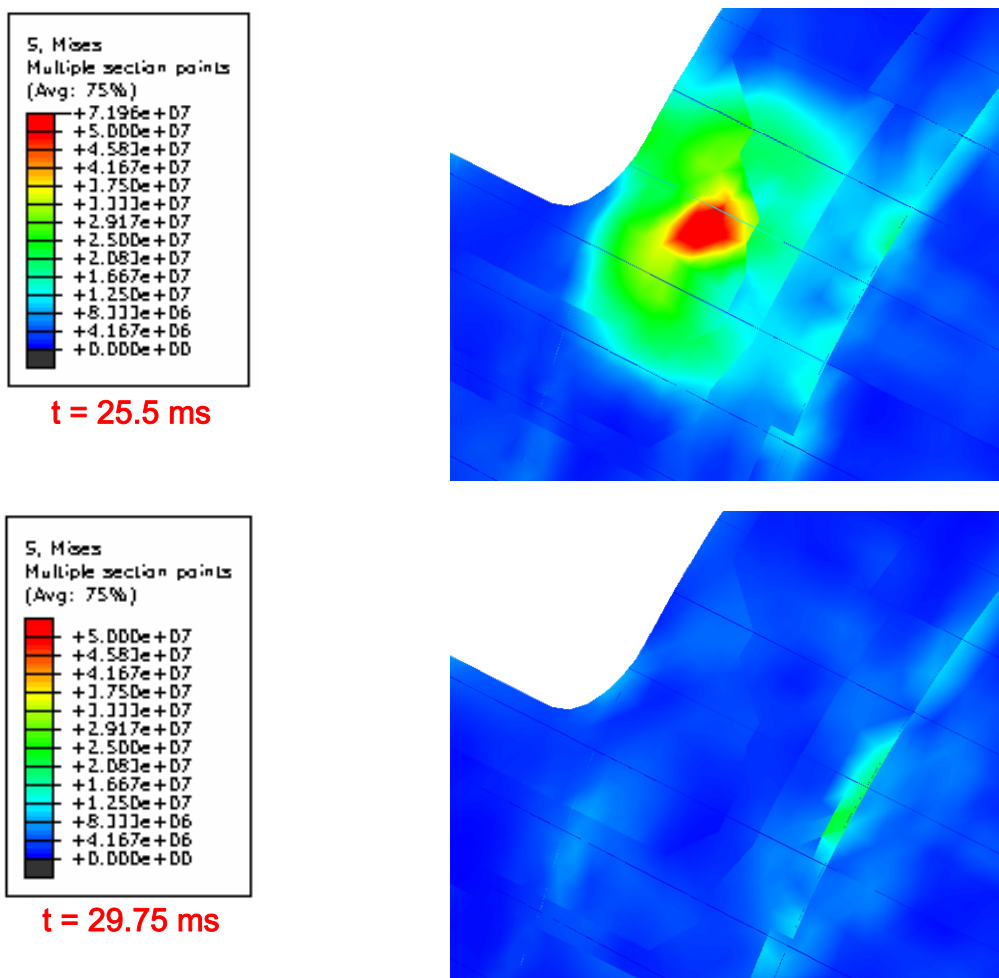
$t = 17 \text{ ms}$



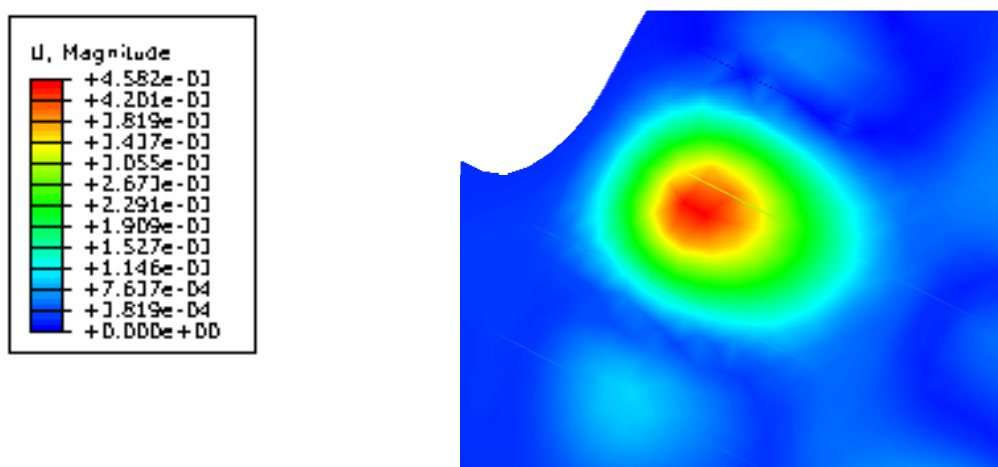
$t = 21.25 \text{ ms}$



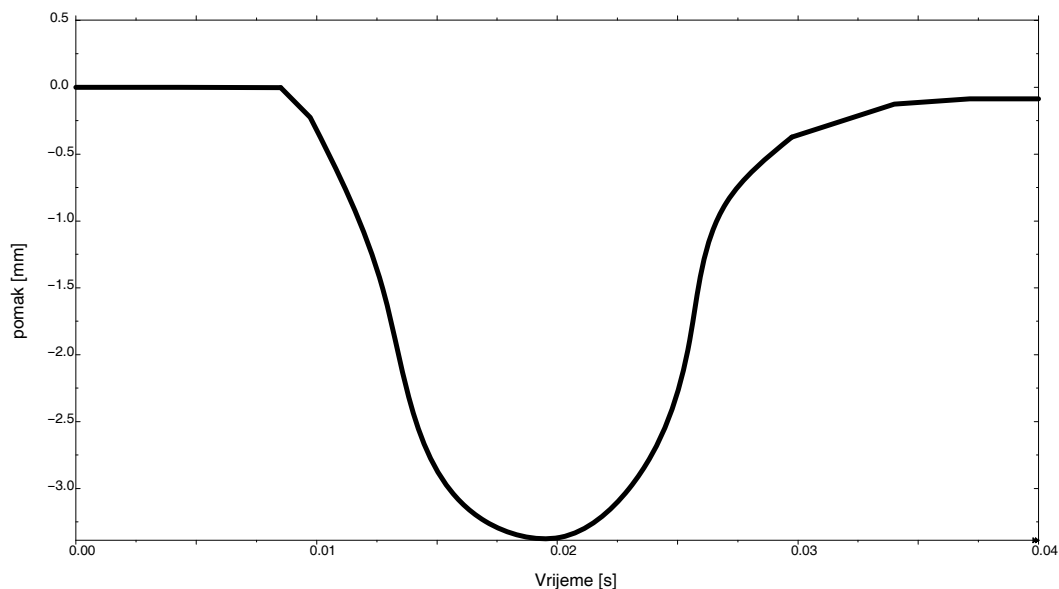




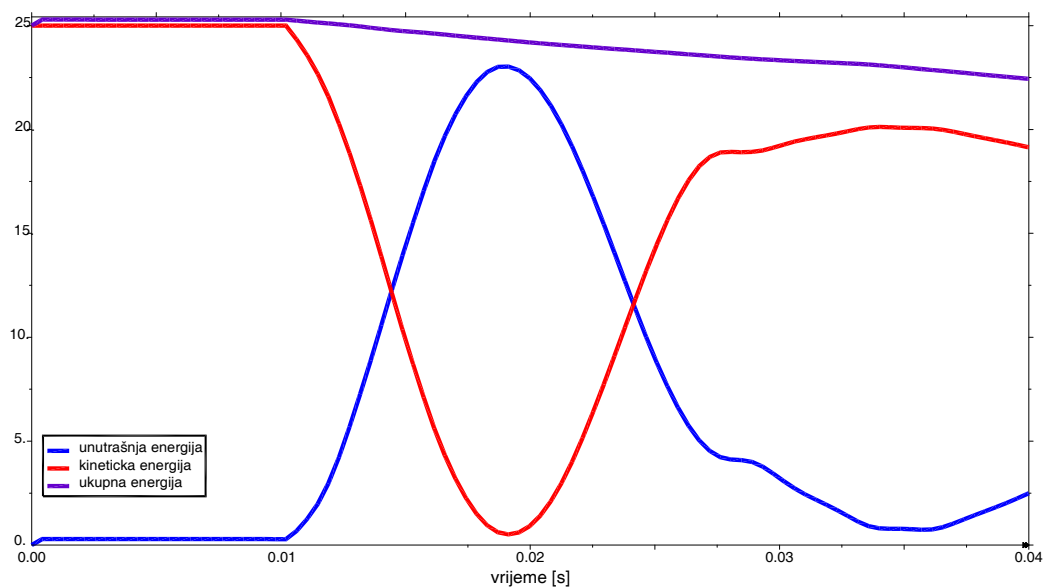
Slika 5.22 Raspodjela ekvivalentnog Von Mises naprezanja za trajanje analize od 85 ms pri brzini udarača 1 m/s u oplatu debljine 6 mm



Slika 5.23 Raspodjela veličine pomaka na mjestu udara pri brzini udarača od 1 m/s u oplatu debljine 6 mm



**Slika 5.24** Raspodjela pomaka točke udara „C“ za dio analize<sup>6</sup> trajanja 40 ms pri brzini udarača 1 m/s u lim debljine 6 mm



**Slika 5.25** Raspodjela ukupne, unutrašnje i kinetičke energije za dio analize trajanja 40 ms pri brzini udarača 1 m/s u lim debljine 6 mm

Maksimalna ekvivalentna von Mises naprezanja ni za ovaj slučaj ne prelaze granice plastičnosti, iznose oko 169 MPa.

Maksimalan pomak točke udara konstrukcije iznosi oko 3.3 mm.

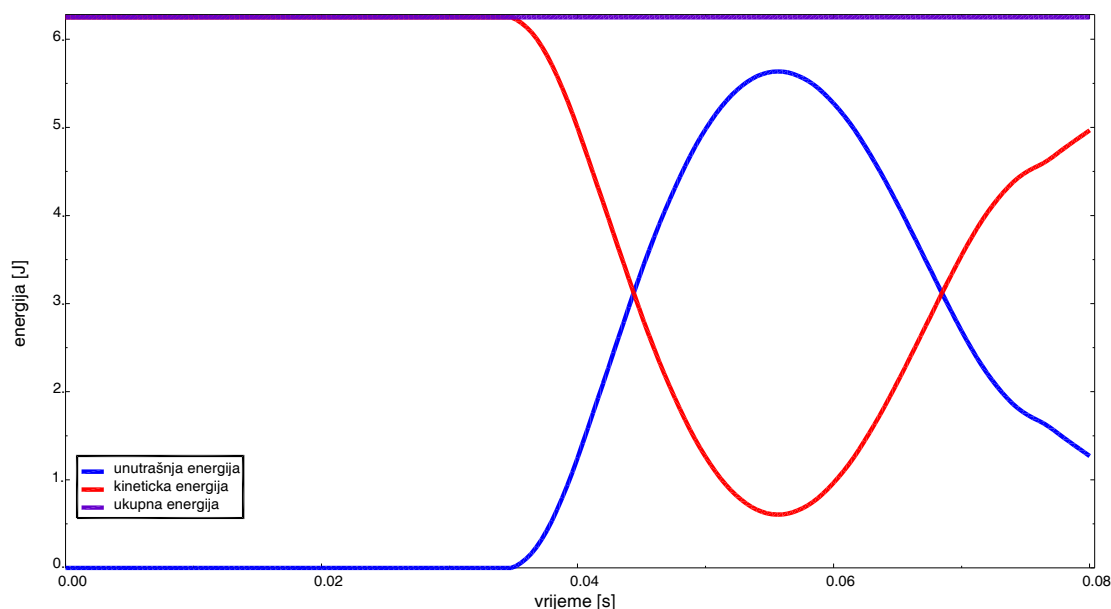
<sup>6</sup> Ukupno trajanje analize za ovaj slučaj iznosi 85 ms.



Iz dobivenih je rezultata vidljivo da praktički ne dolazi do trajnih deformacija vanjskog dijela konstrukcije, osim za jedan slučaj kada je ta granica za zadane uvjete pređena za relativno malen iznos (brzina udara 1 m/s na dijelu oplata debljine 1.6 m/s).

Ono što na prvi pogled djeluje zabrinjavajuće jesu raspodjele ukupnih energija za svaku analizu i početni skok unutrašnje energije. Naime, ne bi trebalo, tijekom cijelog trajanja analize, doći do ikakvog pada ukupne energije, što kod promatranih analiza nije slučaj. Razlog tomu najvjerojatnije leži u korištenju kinematičkih veza ljuskastih i grednih elemenata (*Tie Constraint-a*)

Kako bi se eliminirao utjecaj tih kinematičkih veza, provedena je probna analiza udara pri 0.5 m/s u lim debljine 4 mm korištenjem samo ljuskastih elemenata, te je za takav model dobivena korektnija raspodjela energija (slika 5.26).



**Slika 5.26 Raspodjela energije za probni model sastavljen od samo ljuskastih elemenata; brzina udarača 0.5 m/s, debljina oplata 4mm**

Bitan čimbenik ovakve analize predstavlja vrijeme izračunavanja na računalu. Kod zadanog modela ono je iznosilo oko 6 sati, na računalu opremljenom s 2 četverojezgrema procesora radnog takta 1.93 GHz po jezgri i 8 GB radne memorije. Gustoća mreže iznosi oko 20000 ljuskastih i oko 600 grednih elemenata.

Usporedbe radi, vrijeme izračunavanja iste analize, na dotičnom računalu za model koji se sastoji samo od ljuskastih elemenata (iste gustoće mreže) iznosi nešto više od 18 min.

## 6. Zaključak

Rezultati dobivenom dinamičkom tranzijentnom nelinearnom analizom pokazuju kako nije došlo do plastičnih (trajnih) deformacija na promatranom modelu. Razloga može biti nekoliko; površina udarača je polukuglastog oblika i koliko god malena bila, nije dovoljno oštra da za promatrani kontakt dviju površina prouzroči oštećenja zabilježena u praksi.

Korištena metoda eksplicitne dinamike možda dobro ne opisuje promatrani problem; ona dobro funkcionira za izrazito brze događaje (npr. udar metka u podlogu), dok je kod analiziranog modela ta brzina bila izuzetno mala, te samom algoritmu možda nije pogodovala takva brzina kontakta.

Najveći problem je predstavljalo korištenje grednih elemenata u sprezi s ljuskastim, gdje su kinematičke veze Abaqus-u predstavljale najveću poteškoću; kako sa stajališta trajanja analize, koje je bila izrazito duga za ovu vrstu problema i finoću mreže, tako i sa interpretacijom energija i deformacija u modelu.

Riješenje ovih problema bi se moglo pronaći u modeliranju uzdužnica i okvira kao površina te njihovom interpretacijom kao ljuskatih elemenata, gdje bi se puno „bezbolnije“ mogli povezati s ljuskatim elementima oplata. Drugi način bi uključivao namještanje čvorova grednih elemenata na čvorove ljuskatih; ova bi mogućnost mogla dobro funkcionirati samo kod pravilnih geometrija modela, što ovdje nije bio slučaj.

Usprkos relativno velikim računalnim mogućnostima, koje su bile na raspolaganju, za detaljniju analizu i dobivanje većeg broja rezultata jednostavno nije bilo vremena, ali razmatrana tematika time nipošto ne mora biti završena.

## 7. Literatura

- [1] <http://www.wikipedia.hr>
- [2] Ivetić, Goran: Diplomski rad, Zagreb 2006
- [3] <http://www.airliners.net>
- [4] Airbus 319 Structural Repair Manual
- [5] Getting started with Abaqus
- [6] Abaqus Analysis User's Manual
- [7] <http://www.matweb.com>
- [8] MIL-HDBK-5J METALLIC MATERIALS AND ELEMENTS FOR AEROSPACE  
VEHICLE STRUCTURES, Department of Defense Handbook, 2003